



**PEDRO FILIPE
ALVES DE ALMEIDA**

**Análise económico-ambiental de alimentação artificial de
praias**



**PEDRO FILIPE
ALVES DE ALMEIDA**

**Análise económico-ambiental de alimentação artificial de
praias**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Doutor Peter Roebeling, Investigador Auxiliar do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

"Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT e União Europeia (COMPETE, QREN, FEDER), no âmbito do projecto ADAPTARia – Climate Change Modelling on Ria de Aveiro Littoral: Adaptation Strategy for Coastal and Fluvial Flooding (PTDC/AAC-CLI/100953/2008)."

Dedico este trabalho aos meus pais, irmão, avós e à minha namorada Maria.

o júri

presidente

Prof^a. Doutora Filomena Maria Pedrosa Ferreira Martins

Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Peter Cornelis Roebeling

Equiparado a Investigador Auxiliar do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) do Dep. Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Rui Pires de Matos Taborda

Professor Auxiliar do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Agradecimentos

Terminada esta jornada, não posso deixar passar a oportunidade para agradecer:

- Ao Dr. Peter Roebeling pela orientação, ensinamentos, apoio e pela paciência, fundamentais para a realização do trabalho.
- Ao Dr. Carlos Coelho também pelos ensinamentos transmitidos, pela atenção disponibilizada e pela importante colaboração que manteve durante a discussão e concretização do trabalho.
- Aos meus pais pelas oportunidades, apoio e confiança que depositaram em mim ao longo destes anos.
- À minha namorada Maria por ter sido a companheira que precisei nos bons e nos maus momentos, pelo carinho e ajuda intermináveis.
- Aos que ficam marcados desta aventura académica, Martinho, Isabel, Filipe, Rita, Alex, Sónia, Juliana, Helena, Tânia, Ângela e Teresa e aos amigos de sempre, Diogo, Leandro, Paulo Jorge, Vitor, Filipe e Christophe.
- Um agradecimento também especial a todos aqueles que me acompanharam na Coordenação do NEEA e na Comissão de Faina em 2010 e na direção da AAUAv em 2011, foi um prazer trabalhar convosco.

Palavras-chave

Proteção Costeira, alimentação artificial, modelação numérica, análise económico-ambiental.

Resumo

A crescente vulnerabilidade das zonas costeiras, quer por ação da natureza ou pela pressão humana, tem sido alvo de estudos físicos, locais e regionais e também de estudos económico-ambientais, a nível regional e global, que avaliam as consequências da erosão e procuram dar suporte a medidas de gestão e proteção costeira. O estudo realizado nesta tese pretende fazer a integração destas abordagens, procurando destacar a relevância das intervenções de alimentação artificial no contexto da proteção costeira e também preencher uma lacuna na literatura, através da realização duma análise económico-ambiental à escala local. O objetivo desta tese de mestrado era realizar uma análise económico-ambiental a um caso de estudo genérico de alimentação artificial de praias, adaptado às condições da região Centro de Portugal. Foi utilizado o modelo numérico LTC (Long Term Configuration) para verificar a evolução da linha de costa do cenário de referência, bem como para a simulação de oito cenários de alimentação artificial de praias definidos com volume variável entre 0,5 e 7 Mm³, num horizonte de 50 anos. Posteriormente efetuou-se uma análise económico-ambiental, aplicada a áreas de praias e dunas e áreas urbanas protegidas, através da determinação de três indicadores económicos: Valor Atual Líquido (VAL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Ponto de Equilíbrio (PE), a uma taxa de desconto de 5%, bem como, pela otimização dinâmica do sistema para obtenção de um volume ótimo de alimentação artificial. Os resultados mostram que, para a situação de áreas de praias e dunas protegidas, o cenário 1 (alimentação artificial de 0,5 Mm³) é o único exequível, por apresentar o VAL positivo (0,05 M€) e a TIR superior a 5% (5,13%), no entanto, o volume ótimo determinado foi de 0,1 Mm³. Para a situação das áreas urbanas protegidas, os resultados indicam que qualquer dos cenários estudados é executável. Independentemente do volume implementado, como os benefícios da proteção destas áreas são elevados, os custos da alimentação artificial são recuperados em poucos anos (2 a 7 anos) e a recomendação é que estas intervenções se realizem periodicamente.

Keywords

Coastal protection, artificial nourishment, numerical modelling, environmental-economic analysis.

Abstract

The increasing vulnerability of coastal zones, whether for natural causes or human pressure, has encouraged physical studies, at local and regional level, and environmental-economic studies, at regional and global level, in order to evaluate erosion's impacts and to support measures of management and coastal protection. The study in this Master Thesis intends to integrate these approaches, by highlighting the relevance of beach artificial nourishment in the context of coastal protection, as well as to fill a gap in the state-of-art, by performing an environmental-economic analysis at local scale. So, the main goal of this Master Thesis was to perform an environmental-economic analysis in a stylized case study of beach artificial nourishment, adapted to Central Portugal conditions. A numerical model LTC (Long Term Configuration) was used to verify the evolution of the coastline position in the reference scenario, as well as to simulate eight different scenarios of beach nourishment defined for volumes between 0.5 and 7 Mm³, in a 50 years horizon. Afterwards, the environmental-economic analysis was applied to protected beach and dune areas and urban areas, by determining three economic indicators: Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Break Even Point) and by performing a dynamic optimization of the system in order to obtain the optimal volume for the artificial nourishment. Results show that, in the situation of protected beach and dune areas, scenario 1 (artificial nourishment of 0,05 M€), is the only of all scenarios that's executable, since it presents a positive NPV (0,05 M€) and IRR superior to 5% (5,13%), however, the optimal volume determined was 0,1 Mm³. Relatively to the situation of protected urban areas, results show that any of the studied scenarios is likely to be applied, no matter what's the implemented volume. Once the benefits of protected urban areas are very high and the costs of artificial nourishment are recovered after a short period (2 to 7 years), it's recommendable that these interventions occur periodically.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Introdução geral	1
1.2 Enquadramento	2
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Abordagem	7
1.5 Estrutura da tese	8
Capítulo 2 – Revisão da literatura	9
2.1 Estudos biofísicos da evolução da linha da costa e proteção costeira.....	9
2.2 Análises custo-benefício da proteção costeira.....	21
2.3 Estudos económico-ambientais da erosão e proteção costeira.....	26
Capítulo 3 – Abordagem.....	29
3.1 Modelo de evolução da linha da costa	29
3.2 Análise económico-ambiental	32
3.2.1 Estimativa dos custos da alimentação artificial	32
3.2.2 Estimativa dos benefícios da proteção costeira	34
3.2.3 Análise custo-benefício	38
3.2.4 Otimização dinâmica.....	41
Capítulo 4 – Caso de estudo	43
4.1 Condições iniciais para a zona costeira da região Centro de Portugal.....	43
4.2 Cenários de alimentação artificial	44
Capítulo 5 – Resultados.....	47
5.1 Análise física do cenário de referência	47

5.1.2 Discussão.....	48
5.2 Análise física dos diferentes cenários.....	50
5.2.2 Discussão.....	53
5.3 Análise económico-ambiental dos diferentes cenários.....	56
5.3.2 Discussão.....	66
Capítulo 6 – Conclusões	71
6.1 Considerações finais	71
6.2 Considerações futuras	73
Referências Bibliográficas	77
Anexo 1.....	85

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tipologias de obras de defesa de costeira. (Adaptado de Burchartch e Hughes (2001)).	5
Tabela 2 - Situações de alargamento da praia após o início do enchimento (m) (Clímaco <i>et al.</i> , 2005).	16
Tabela 3 - Estudos económicos que avaliam casos de alimentação artificial estabelecendo uma relação custo/volume.	33
Tabela 4 - Valores dos ecossistemas costeiros, por tipo de uso do solo CORINE Land Cover (CLC) (em € de 2000; Fonte: (Alves <i>et al.</i> , 2009)).	36
Tabela 5 - Custo por m ² de áreas edificadas em Esmoriz, Cortegaça e Furadouro (Fontão, 2008).	37
Tabela 6 - Caracterização dos cenários simulados, representando diferentes volumes de alimentação (Mm ³).	46
Tabela 7 - Total de área perdida no cenário de referência, para 50 anos (ha).	48
Tabela 8 - Área perdida por secção de estudo, no cenário de referência (em ha).	48
Tabela 9 - Total de área perdida nos cenários 1 a 8, ao longo de 50 anos (ha).	51
Tabela 10 - Total de área ainda não perdida, para os diferentes cenários (em ha).	52
Tabela 11 - Valor atual líquido (VAL) para áreas de praia e dunas e áreas urbanas (M€).	56
Tabela 12 - Análise de sensibilidade ao VAL, para áreas de praia e dunas (M€).	57
Tabela 13 - Análise de sensibilidade ao VAL, para áreas urbanas (M€).	57
Tabela 14 - Taxa interna de retorno (TIR) para áreas de praia e dunas e áreas urbanas (%).	59
Tabela 15 - Análise de sensibilidade ao TIR para áreas de praia e dunas (%).	60
Tabela 16 - Análise de sensibilidade à TIR para áreas urbanas (%).	60
Tabela 17 - Ponto de Equilíbrio (PE) para áreas de praia e dunas e áreas urbanas (anos).	62
Tabela 18 - Análise de sensibilidade ao BEP para áreas de praia e dunas (anos).	63

Tabela 19 - Análise de sensibilidade ao BEP para áreas urbanas (anos).....	63
Tabela 20 - Análise de sensibilidade aos valores ótimos de alimentação artificial, para áreas de praia e dunas.	65
Tabela 21 - Quadro resumo da análise económico-ambiental realizada para o caso de estudo base e os respetivos extremos obtidos pela análise de sensibilidade, para áreas de praias e dunas.	72
Tabela 22 - Quadro resumo da análise económico-ambiental realizada para o caso de estudo base e os respetivos extremos obtidos pela análise de sensibilidade, para áreas urbanas.	73

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema representativo das estratégias delineadas pelo IPCC no combate à subida do nível do mar (adaptado de IPCC (1990).	4
Figura 2 - Esquema da abordagem utilizada no desenvolvimento da tese.	7
Figura 3 - Localização de Bangkhuntien, adaptado de Ekphisutsuntorn <i>et al.</i> (2010).	11
Figura 4 - Erosão (em m) da linha de costa em Bangkuntien de 1980 a 2002, adaptado de Ekphisutsuntorn <i>et al.</i> (2010).	12
Figura 5 - Simulação da linha costeira de Bangkhuntien em 2028 a partir do modelo Genesis, adaptado de Ekphisutsuntorn <i>et al.</i> (2010).	12
Figura 6 - Ilha de Porto Santo, Madeira. Adaptado de Clímaco <i>et al.</i> (2005).	14
Figura 7 - Evolução morfológica da praia de Porto Santo (1976-2003) (Clímaco <i>et al.</i> , 2005). ..	15
Figura 8 - Localização da área de estudo, adaptado de (Coelho <i>et al.</i> , 2010).	17
Figura 9 - Representação da área de referência modelada com as características da ondulação e estruturas de defesa costeira (Coelho <i>et al.</i> , 2010).	18
Figura 10 - Localização dos casos de estudo: A) Costa Nova/Vagueira; B) Quarteira/Vale do Lobo (Taborda <i>et al.</i> , 2005).	22

Figura 11 - Áreas elegíveis para implementação dos cenários propostos no estuário de Humber, adaptado de Turner <i>et al.</i> (2007).	24
Figura 12 - Esquema da abordagem utilizada no desenvolvimento da tese e distribuição por capítulos.	29
Figura 13 - Esquemática da formulação de base nos modelos de uma linha e no modelo LTC (Coelho, 2005).	30
Figura 14 - Organigrama da sequência de cálculo do LTC (Coelho, 2005).	31
Figura 15 - Valor atual de uma unidade monetária (dólares) em função de várias taxas de desconto, ao longo do tempo (anos). Adaptado de Brealey <i>et al.</i> (2001).	40
Figura 16 - Perfil transversal da configuração do cenário de referência, no ano 0.	43
Figura 17 - Configuração da linha de costa a modelar nas condições iniciais de simulação.	44
Figura 18 - Área perdida no cenário de referência ao longo de 300 anos ($\times 10^3$ ha).....	45
Figura 19 - Simulações do cenário de referência, a 50 anos.....	47
Figura 20 - Configuração em planta da linha de costa, em função das condições de alimentação sedimentar nas fronteiras (extrapolação das condições de transporte sedimentar vizinhas às fronteiras) (Coelho,2005).	49
Figura 21 - Evolução das áreas que constituem os 8 cenários ($0,5 \text{ Mm}^3$ a 7 Mm^3) modelados ao longo de 50 anos (m^2).	53
Figura 22 - Translação de perfil associada à densidade do volume adicionado, usando areia compatível. Adaptado de (Dean, 2002).	54
Figura 23 - Esquema representativo da refração na crista das ondas numa área de alimentação artificial. Adaptado de (Dean, 2002).	54
Figura 24 – Três fases do transporte de sedimentos após alimentação artificial de areia. Adaptado de (Dean et al., 1993).	55
Figura 25 - Análise de sensibilidade ao valor atual líquido para áreas de praia e dunas, nos diferentes cenários ($\text{M€}/\text{Mm}^3$).	58

Figura 26 - Análise de sensibilidade ao valor atual líquido para áreas urbanas nos diferentes cenários (M€/Mm ³).	58
Figura 27 - Análise de sensibilidade à taxa interna de retorno para áreas de praias e dunas, nos diferentes cenários (%/Mm ³).	61
Figura 28 - Análise de sensibilidade à taxa interna de retorno para áreas urbanas, nos diferentes cenários (%/Mm ³).	61
Figura 29 - Relação custos/benefícios em função do volume de areia (Mm ³)	64
Figura 30 - Análise de Sensibilidade aos custos/benefícios em função do volume de areia (M€/Mm ³), para áreas de praias e dunas.	65
Figura 31 - Análise de Sensibilidade aos custos/benefícios em função do volume de areia (M€/Mm ³), para áreas urbanas.....	66
Figura 32 - Representação do cenário 0 (sem alimentação artificial) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.....	i
Figura 33 - Representação do cenário 1 (0,5 Mm ³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.....	ii
Figura 34 - Representação do cenário 2 (1 Mm ³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.....	iii
Figura 35 - Representação do cenário 3 (2 Mm ³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.....	iv
Figura 36 - Representação do cenário 4 (3 Mm ³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.....	v
Figura 37 - Representação do cenário 5 (4 Mm ³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.....	vi
Figura 38 - Representação do cenário 6 (5 Mm ³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.....	vii
Figura 39 - Representação do cenário 7 (6 Mm ³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.....	viii

Figura 40 - Representação do cenário 8 (7 Mm ³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controle de 5 em 5 anos.....	ix
--	----

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Introdução geral

Portugal caracteriza-se pela sua extensa linha de costa¹, a qual se dispõe ao longo de 1.187 quilómetros divididos entre o Oceano Atlântico e o Mar Mediterrâneo (PCM, 2009). A zona costeira², é composta por regiões baixas arenosas e/ou rochosas e por regiões altas de arribas, estuários e fajãs insulares, que lhe conferem grande variedade geomorfológica (PCM, 2009).

A sobreposição de diversos fatores de erosão que vêm desgastando grande parte da zona costeira tem atingido um impacto significativo e as principais causas que lhe estão associadas provêm da subida do nível do mar, a diminuição do afluxo de sedimentos, as alterações climáticas e a ação do Homem (Dias *et al.*, 2000, Gomes, 2007). Na história da evolução da linha de costa portuguesa até meados da Era Holocénica (última era glacial), o principal fator de erosão terá sido a elevação eustática do nível do mar. De então até ao presente, tem-se assistido a uma maior contribuição por parte de fatores não-eustáticos, nomeadamente barreiras dinâmicas e deposição de sedimentos terrígenos. Numa última fase, a ação do Homem, através da desflorestação, criação de zonas de cultivo e construção de barragens, têm-se verificado como os fatores que mais promovem a erosão costeira (Dias *et al.*, 2000).

Um dos fenómenos de erosão de maior impacto surge nos troços do litoral³ coincidentes com os locais onde é exercida maior pressão urbana. O relatório do Estado do Ambiente de 2004, com base em dados da União Europeia, indicava que cerca de 28,5% da costa portuguesa é afetada pela erosão, colocando Portugal como um dos países onde o fenómeno se manifesta com maior gravidade (DGOTDU, 2007).

Em termos sociais, partindo duma avaliação à população que reside em zonas costeiras, importa compreender a sensibilidade dos números, no que toca à própria definição de zona costeira. Deste modo, Carreau e Gallego (2006) estimaram que cerca de 86 milhões de pessoas

¹ Linha de costa – “fronteira entre a terra e o mar materializada pela interceção do nível médio do mar com a zona terrestre” (Gomes, 2007).

² Zona costeira – “porção de território influenciada direta e indiretamente em termos biofísicos pelo mar (ondas, marés, ventos, biota ou salinidade) e que pode ter para o lado de terra largura tipicamente de ordem quilométrica e se estende, do lado do mar, até ao limite da plataforma continental” (Gomes, 2007).

³ Litoral – “termo geral que descreve porções do território que são influenciadas direta e indiretamente pela proximidade do mar” (Gomes, 2007).

dos 25 países da União Europeia (EU-25), habitariam entre 0-10 km da zona costeira (cerca de 19% do total dos EU-25). Na Europa, a densidade populacional no litoral (NUTS-3⁴) é geralmente superior à que se verifica no interior, em cerca de 10% (Gallego, 2006). As zonas costeiras são, por norma, atrativas uma vez que proporcionam um espectro alargado de atividades. Desde atividades económicas tradicionais como a indústria, a pesca e a agricultura, e de lazer como a prática de banhos e natação recreativa, turismo, jogos de praia, desportos náuticos e pesca desportiva, até atividades mais modernas como o parapente motorizado ou *karting* na praia. Disponibilizam também uma vasta oferta de produtos e serviços comerciais, como o artesanato, hotelaria e restauração, bem como, redes rodoviárias extensas (DEFRA, 2004).

Em termos ambientais, a importância ecológica da zona costeira distingue-se pela diversidade dos ecossistemas terrestres e marinhos. Analisando uma faixa interior compreendida entre a costa e 100 km da mesma, Burke *et al.* (2000), verificaram que 72% da costa, a nível mundial, pode ser considerada natural, enquanto 28% será considerada como alterada pela atividade humana (agricultura ou desenvolvimento urbano). Distinguem-se os tipos de ecossistemas, terrestres, marítimos e alterados/semi-alterados pelo Homem (Burke *et al.*, 2000, Martinez *et al.*, 2007). Estes ecossistemas costeiros proporcionam bens e serviços ambientais muito valorizados pelas sociedades em geral. Os serviços disponibilizados pelos habitats costeiros incluem não só alimento para humanos e animais, como também sal, recursos minerais e petrolíferos, materiais de construção, energia, além de toda a biodiversidade natural com diversas aplicações na biotecnologia e na medicina. A importância económica completa-se ainda no valor imputado a estas áreas, não só para habitação, mas também para transporte, recreação e turismo (Martinez *et al.*, 2007).

1.2 Enquadramento

A proteção costeira tem merecido uma preocupação crescente com as consequências associadas à erosão e nas últimas décadas surgiram ferramentas políticas a nível europeu para enfrentar esta problemática. Em 1981 surge a Carta Europeia do Litoral, sendo esta transposta através do Decreto-Lei nº 302/90, de 26 de Setembro, que “*estabelece os princípios a que deve*

⁴ NUTS-3 – Nomenclatura de Unidades Territoriais para Fins Estatísticos. Sistema hierárquico de divisão do território económico da União Europeia. O nível três refere-se a pequenas regiões para diagnósticos específicos. (EUROSTAT, 2010)

obedecer a ocupação, uso e transformação da faixa costeira". No seguimento deste documento, surge o Programa de Demonstração sobre Gestão Integrada das Zonas Costeiras, indicando os princípios gerais orientadores da estratégia de gestão integrada de zonas costeiras na Europa (DGOTDU, 2007).

A estratégia de proteção da zona costeira em Portugal e o conceito de gestão integrada suscitaram procedimentos legislativos há mais de 30 anos. Em 1971, surge o Decreto-Lei nº 468/71, de 5 de Novembro, que define o regime jurídico dos terrenos de domínio público hídrico, estabelecendo regras para a sua ocupação. Permite-se assim, a organização duma faixa de proteção ao longo da zona costeira, constituída pelo leito e margem das águas do mar. Em 1992, foi aprovado o Decreto-Lei nº 309/93, de 2 de Setembro, que veio regular a elaboração e aprovação dos planos de ordenamento da orla costeira⁵ (POOC) (DGOTDU, 2007).

Os documentos que constituem as políticas de orientação à Gestão Integrada das Zonas Costeiras (GIZC) reconhecem três áreas críticas de intervenção: i) a importância das interações terra/mar; ii) a dimensão humana nos processos costeiros; iii) a necessidade de integrar diferentes sectores e intervenientes (*stakeholders*), de modo a evitar conflitos que conduzam a um desenvolvimento insustentável (EU, 2006). Neste sentido, surgiram dois documentos:

- Comunicação da Comissão para a Gestão Integrada das Zonas Costeiras - ICZM Strategy, COM(2000)547 final (EU, 2000). Aponta os desafios da gestão das zonas costeiras e as conclusões do Programa de Demonstração de GIZC da Comissão Europeia;
- Recomendação do Parlamento Europeu e do Conselho para a implementação da Gestão Integrada das Zonas Costeiras na Europa - EU ICZM Recommendation, 2002/413/CE (EU, 2002). Estabelece oito princípios de atuação.

No âmbito da resposta às alterações climáticas, o Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC), através do grupo de trabalho para a gestão das zonas costeiras, delineou estratégias para a adaptação à subida do nível do mar. Surgem então três estratégias, assentes em três ações: retirar, acomodar e proteger (ver Figura 1) (IPCC, 1990).

⁵ Orla Costeira - porção do território onde o mar exerce diretamente a sua ação, coadjuvado pela ação eólica e que tipicamente se estende para o lado de terra por centenas de metros e se estende, do lado do mar, até à batimétrica dos 30 m (englobando a profundidade de fecho) (Gomes, 2007).

Retirar implica que nenhum esforço é concretizado para proteger a terra do mar. A zona costeira é abandonada e os ecossistemas são invadidos sofrendo alterações. Esta opção pode ser motivada pelo impacto económico excessivo ou pelos impactos ambientais resultantes da proteção. Em casos extremos, toda a área pode ser abandonada.

Acomodar implica que as populações continuam a utilizar a área mas não são tomadas ações para prevenir a ocorrência de inundações. Esta opção inclui a construção de abrigos de emergência para cheias, elevação de edifícios com pilares, conversão de espaços agrícolas em viveiros de peixes ou a criação de áreas resistentes às cheias e ao sal marinho.

Proteger envolve a construção de estruturas rígidas como diques ou esporões, ou a implementação de outras soluções mais flexíveis como dunas e vegetação, de modo a que se consiga impedir o avanço do mar sobre a terra, mantendo assim, o uso existente do solo.

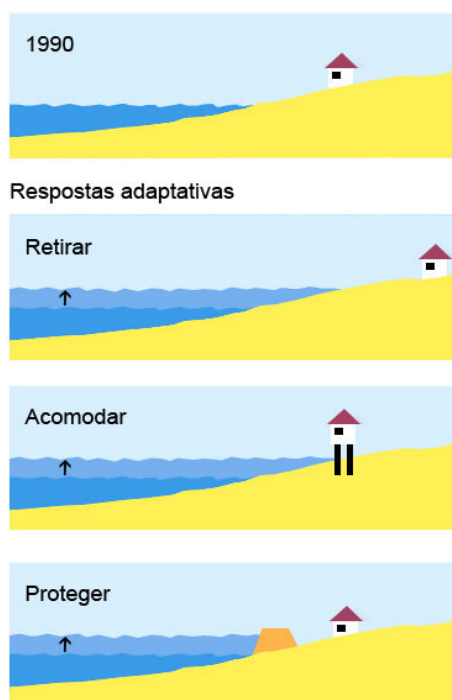


Figura 1 - Esquema representativo das estratégias delineadas pelo IPCC no combate à subida do nível do mar (adaptado de IPCC (1990)).

A construção de estruturas de proteção costeira surge, usualmente, em áreas com frentes urbanas densamente povoadas, áreas portuárias e embocaduras de rios, ameaçados pelo desenvolvimento natural dos processos costeiros (Neves, 2003). Na Tabela 1, encontram-se definidos vários tipos de estruturas, rígidas e não-rígidas, de defesa costeira (Burchartch e Hughes, 2001).

Tabela 1 - Tipologias de obras de defesa de costeira. (Adaptado de Burchartch e Hughes (2001)).

Obra de defesa	Objetivo	Função principal
Obra longitudinal aderente	Proteção da destruição de frentes marítimas urbanizadas, por dissipação da energia da onda, redução de inundações e galgamentos.	Reforço estrutural do alinhamento longitudinal.
Esporão	Conter a erosão de uma praia.	Interceção do transporte de sedimentos por corrente de deriva.
Quebra-mar	Abrigo de bacias portuárias, entradas de portos contra ondas e correntes.	Dissipação da energia de onda e/ou reflexão dessa energia de novo para o mar.
Quebra-mar destacado	Conter a erosão de uma praia ou aumentar a sua largura pela formação de um tómbolo.	Redução das alturas de ondas; Redução do volume de sedimentos transportados por corrente de deriva litoral.
Quebra-mar destacado submerso	Conter a erosão de uma praia.	Redução das alturas de onda que atingem a costa
Alimentação e transposição artificial de praias	Conter a erosão de uma praia e proteção contra inundações.	Enchimento artificial de praias e dunas com sedimentos que posteriormente são erodidos.
Molhes	Estabilização dos canais de navegação em embocaduras de rios.	Confinamento e controlo de correntes e marés; Proteção contra cheias.
Proteção de pé de talude	Prevenção da erosão costeira provocada por infraescavações.	Aumentar a resistência à erosão causada por ondas e correntes.

A alimentação artificial de praias constitui uma solução de estrutura não-rígida para a prevenção da erosão costeira. A escolha do material a transferir deve considerar a dimensão, granulometria e densidade da areia já existente no local. A alimentação pode, não só, proteger a praia onde é colocada, mas também trechos afetados pela corrente litoral, uma vez que são criadas fontes de areia a barlar desses pontos (Burchartch e Hughes, 2001).

Neste contexto de vulnerabilidade costeira, na literatura surgiram diversos estudos que visam a análise física da erosão, a avaliação e propostas de gestão de defesa costeira. O estudo da evolução da linha de costa dispõe de vários de modelos numéricos de simulação que, ainda que apresentem diferentes potencialidades e limitações, possuem a mesma finalidade (Hanson *et al.*, 2003, Vicente e Clímaco, 2003, Coelho *et al.*, 2009). A avaliação e proposta de soluções de defesa costeira contam com ferramentas de suporte como a análise custo-benefício (ACB), aplicada a escalas locais ou regionais, que utiliza indicadores económicos para avaliar os impactos da erosão (Taborda *et al.*, 2005, Ekphitsuntsorn *et al.*, 2010, Roebeling *et al.*, 2011a). Seguindo o princípio comum da estimativa dos impactos das alterações climáticas (subida do nível do mar) nas zonas costeiras, as análises económico-ambientais surgem à

escala regional e global, partindo de modelos estáticos e dinâmicos para determinar custos e benefícios ambientais e sociais e estimar as respetivas variações em termos do produto interno bruto (Fankhauser, 1994, Tol, 2002, Hinkel and Klein, 2003, Bosello *et al.*, 2007). Algumas das fraquezas identificadas na literatura visam os estudos de simulação que descuram a componente económica. Os estudos de ACB, devido às especificidades que apresentam, impõem algumas reticências na extrapolação de resultados para outros casos a escalas maiores, e por outro lado, os estudos de análise económico-ambiental devido à sua dimensão muito ampla, não possuem resolução espacial suficiente para que se discutam dados a escalas pequenas. Assim, esta dissertação pretende integrar as três abordagens apresentadas, num caso de estudo genérico aplicado à escala local, partindo da simulação de cenários de alimentação artificial de praias e estimando os respetivos impactos económicos da erosão e benefícios da proteção costeira.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste estudo passa pela análise económico-ambiental de cenários de alimentação artificial de praias, com recurso ao modelo de evolução de linha de costa LTC (Long Term Configuration) aliado a uma abordagem de transferência de benefícios (transferência de valores ambientais) para a avaliação de recursos costeiros naturais e urbanos. Mais especificamente pretende-se:

1. Avaliar a evolução da linha de costa, com base em parâmetros físicos adaptados à região Centro de Portugal, através da simulação de vários cenários e aplicados a um cenário genérico de linha de costa com representação linear em planta.
2. Estimar os custos da proteção costeira, nomeadamente da alimentação artificial de praias, definindo metodologias e tecnologias de alimentação/transposição artificial de areias e pela avaliação de custos associados a equipamentos, materiais e mão-de-obra.
3. Estimar os benefícios da proteção costeira, com a identificação de bens e serviços costeiros (naturais e urbanos) e pela respetiva definição do valor das áreas urbanas e dos serviços dos ecossistemas.
4. Efetuar uma análise económico-ambiental com base nos indicadores de análise custo-benefício (valor atual líquido, taxa interna de retorno e ponto de equilíbrio, bem como a determinação do volume ótimo de alimentação artificial de praias.

1.4 Abordagem

A abordagem económico-ambiental aplicada no desenvolvimento desta tese seguiu, de forma resumida, a utilização do modelo numérico de simulação LTC, seguido da determinação dos custos da alimentação artificial de praias e determinação dos benefícios de áreas de praias e dunas e áreas urbanas protegidas, sobre os quais foi realizada uma análise custo-benefício e posteriormente uma otimização dinâmica (ver Figura 2).

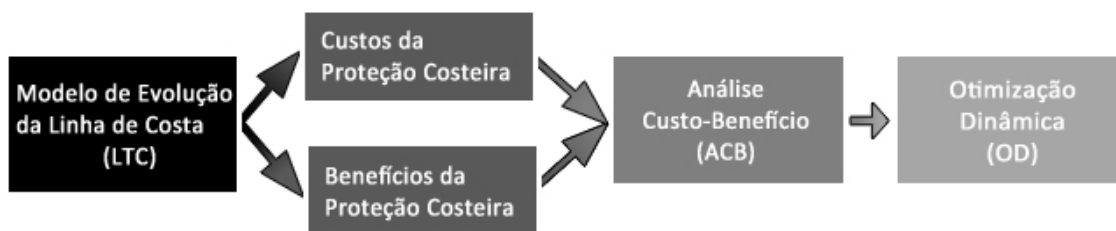


Figura 2 - Esquema da abordagem utilizada no desenvolvimento da tese.

Com o objetivo geral de fazer uma análise económico-ambiental à realização de intervenções de alimentação artificial, a abordagem inicial passou pela utilização do modelo numérico LTC, aplicado a um desenvolvimento linear da posição inicial da linha de costa. A seleção dos dados de entrada para as simulações obedeceu a parâmetros empíricos e experimentais adaptados à região Centro de Portugal, determinados por (Coelho, 2005) e (Coelho *et al.*, 2009).

Para a estimativa dos custos da alimentação artificial foram consultados diversos trabalhos realizados nos últimos anos, com destaque para as várias intervenções a cargo do INAG (2007, 2008 e 2009), que permitiram definir um custo linear para este tipo de operações. Ao nível dos benefícios da proteção costeira foram consideradas duas situações, uma para áreas de praia e dunas e outra para áreas urbanas. O valor dos ecossistemas costeiros seguiu a abordagem da transferência de benefícios e os valores adotados tiveram por base (Costanza *et al.*, 1997, Bossard *et al.*, 2000, Martinez *et al.*, 2007). Já o valor das áreas urbanas foi obtido a partir duma média nacional registada no relatório do ICI (2010), sendo estes valores confrontados com um estudo efetuado por Fontão (2008), acerca de valores imobiliários na área edificada até 200 metros de distância da costa, em Esmoriz, Furadouro e Cortegaça.

Para a concretização da análise custo-benefício, seguiu-se a metodologia de Zerbo e Bellas (2006) e DFA (2006) para o cálculo do valor atual líquido, taxa interna de retorno e ponto de equilíbrio. Os preços usados referem-se a Euro (€) de 2010, e a taxa de desconto utilizada foi de 5%. O volume ótimo obtido a partir da otimização dinâmica teve por base a análise

efetuada por Fankhauser (1994), e resulta da determinação das funções de custos ($C(A_{\#})$) e benefícios ($B(A_{\#})$) descontados da proteção costeira. Por fim efetuou-se uma análise de sensibilidade, fazendo a variação dos custos descontados ($C(A_{\#})$) em -25% e -50% e os benefícios descontados ($B(A_{\#})$) em $\pm 25\%$.

1.5 Estrutura da tese

Esta tese encontra-se dividida em seis capítulos. Inicialmente, o capítulo 1, como já apresentado, introduz a problemática e refere o enquadramento do trabalho desenvolvido. O capítulo 2 faz referência a estudos já efetuados nos diferentes âmbitos propostos nesta tese, nomeadamente, no impacto físico da erosão, na análise custo-benefício e avaliação económico-ambiental da proteção costeira. No capítulo 3 concretiza-se a abordagem teórica dos objetivos definidos, quer na modelação da evolução da linha de costa, como na avaliação económico-ambiental. No capítulo 4 é feita a descrição do caso de estudo e respetivos cenários de simulação. O capítulo 5 apresenta os resultados e é feita a discussão dos mesmos. No capítulo 6 são retiradas as considerações finais, recomendações políticas e respetivas considerações para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Revisão da literatura

2.1 Estudos biofísicos da evolução da linha da costa e proteção costeira

A literatura apresenta um número diverso de casos de estudo relativamente à aplicação de intervenções de alimentação artificial de areias em zonas costeiras. Distinguem-se duas tipologias de estudos biofísicos, os de cariz empírico e os de simulação.

A abordagem relativamente aos estudos empíricos refere casos práticos de intervenção através da alimentação artificial, indicando essencialmente prazos e volumes de areia envolvidos na obra, sem referir custos. Já os estudos de simulação recorrem à aplicação de modelos de configuração de linha de costa que visam estimar os resultados e os impactos da implementação, ou não, de intervenções de defesa costeira, nomeadamente de alimentação artificial de praias.

- ***Modelos de configuração de linha de costa***

A utilização de modelos numéricos tem sido aplicada à generalidade dos sistemas naturais, como forma de prever comportamentos e antecipar potenciais problemas. É importante compreender as dinâmicas dos sistemas costeiros, na medida em que é necessário tomar medidas para resolver questões que poderão implicar não só os ecossistemas, como também o planeamento urbano. Os avanços verificados ao nível da modelação numérica visam, essencialmente, a introdução de diversas características e processos físicos associados às zonas costeiras (Lakhan, 2003).

Não existe um modelo universal aplicável à generalidade dos casos de estudo, já que estes variam com a natureza do problema e com o objetivo a que o estudo se propõe. A maioria dos modelos utilizados baseia-se no transporte de sedimentos e na aplicação da equação da continuidade aos volumes de areia movimentados (Clímaco *et al.*, 2008). Vários autores avaliaram a incerteza de fluxos de sedimentos de correntes recorrendo a diferentes fórmulas empíricas, modelos numéricos e resultados experimentais (Bayram *et al.*, 2001, Davies, 2002, Davies *et al.*, 2002). No entanto, Camenen e Larroudé (2003), efetuaram uma análise de sensibilidade ao transporte de sedimentos para algumas das formulações matemáticas, em parâmetros como o tamanho dos grãos de areia, revelando que nenhuma das fórmulas devolvia resultados satisfatórios na distinção entre granulometrias finas ou grosseiras. Fortunato *et al.* (2008) estudaram o efeito das características dos sedimentos no seu

transporte ao longo da costa, concluindo que a variabilidade do tamanho dos grãos, bem como a sua densidade, poderia induzir em erros iguais ou superiores a 80%.

Pelnard-Considère (1956) foi o primeiro a formular um modelo matemático para calcular a resposta de uma praia ao efeito das ondas. O seu modelo apenas descrevia o movimento da linha de costa, assumindo que o perfil da praia se mantinha sempre com uma forma constante. O trabalho teórico de Pelnard-Considère é a base para vários modelos numéricos que têm sido aplicados com sucesso no cálculo da evolução das configurações de linhas de costa (Hanson, 1989). A extensão da teoria do modelo de uma linha para a inclusão de uma segunda linha foi efetuada por Bakker (1968) e Perlin (1978) generalizou este tipo de modelação, para que englobasse um número arbitrário de linhas. Watanabe (1982) concretizou a primeira tentativa a sério para desenvolver um modelo tridimensional completo de configuração da linha de costa que incluía submodelos para o cálculo da batimetria de aproximação, correntes, transporte de sedimentos e a respetiva evolução da praia. Inicialmente, os esforços ao nível da modelação numérica apontavam para a simulação da forma da praia, enquanto outro tipo de características morfológicas eram consideradas secundárias e excluídas da modelação. No entanto, mais tarde foram realizadas tentativas de inclusão dessas características como, por exemplo, obras de defesa costeiras (Larson and Kraus, 1989) e a inclusão de bancos ou cristas de areia (Falqués *et al.*, 1998).

Os modelos tridimensionais não obtiveram o sucesso desejado na medida em que há uma certa dificuldade em concretizar de forma realista o transporte transversal e respetiva distribuição transversal do transporte longitudinal. Apesar de requererem uma calibração mais rigorosa não se verificam resultados significativamente melhores (Hanson *et al.*, 2003). De seguida são descritos 3 modelos de simulação da linha de costa e no final do capítulo é efetuado o resumo e comparação das potencialidades e limitações de cada um.

- **GENESIS**

O modelo GENESIS (Generalized Model for Simulation Shoreline Change) foi criado pelo U.S. Army's Corps of Engineers. O seu desenvolvimento teve por base a simulação a longo termo da configuração da linha de costa em espaço aberto, induzindo diferenças espaciais e temporais no transporte de sedimentos (Hanson *et al.*, 1991).

A ação das ondas é o mecanismo responsável pelo transporte de areia ao longo da costa. No GENESIS, a taxa de transporte de sedimentos pode ser afetada por diversos fatores como batimetria irregular, difração das ondas, condições fronteira e obstáculos ao transporte

(quebra-mares, esporões, etc.), os quais podem estar interrelacionados em diversas combinações (Hanson *et al.*, 1991). O sistema de modelação é generalista de modo a que possam ser introduzidas características das ondas, configurações das linhas de costa e estruturas de defesa costeira (Hanson *et al.*, 1991). Segue-se a descrição de um caso de estudo em que foi utilizado o GENESIS para estudar a evolução da linha de costa.

- ***Numerical Modeling of Erosion for Muddy Coast at Bangkhuntien Shoreline, Thailand* (Ekphisutsuntorn *et al.*, 2010).**

O objetivo do estudo é a modelação numérica da evolução da linha de costa em Bangkhuntien, Tailândia, utilizando o modelo GENESIS, sem implementação de obras de defesa costeira. A metodologia passa pelo estudo da altura e direção das ondas em Bangkhuntien e previsão da erosão através da simulação da linha de costa com o modelo GENESIS.

O caso de estudo localiza-se em Bangkhuntien pertencente ao distrito de Bangcoque, na Tailândia (ver Figura 3). A sua linha costeira situa-se no Golfo superior da Tailândia e apresenta características lamacentas e floresta de mangais. Na determinação da altura e direção das ondas foi utilizado o modelo SWAN para o período de 1984-2004, mostrando predominância de ondas com 1-1,5 m de altura, com direção su-sudeste (SSE) para sudoeste (SW).

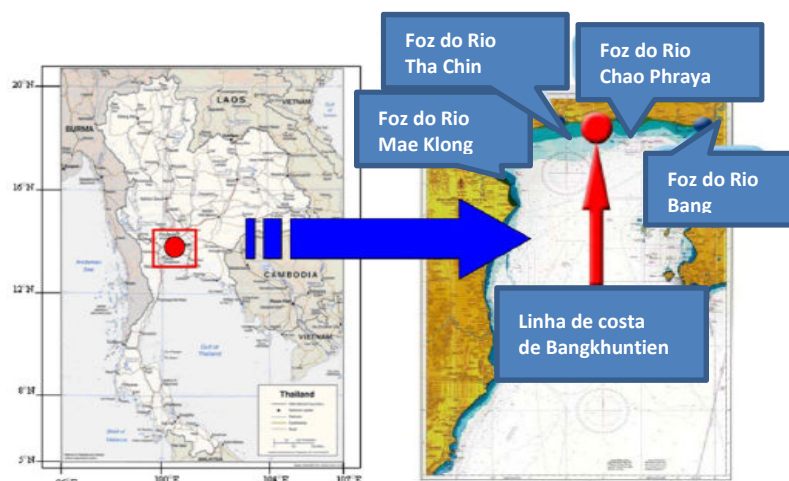


Figura 3 - Localização de Bangkhuntien, adaptado de Ekphisutsuntorn *et al.* (2010).

Foi efetuada a representação da evolução da linha de costa entre 1980 e 2002, através de fotografia aérea, para confrontar com os resultados da simulação que se pretendia entre 1980 e 2028 (Figura 4).

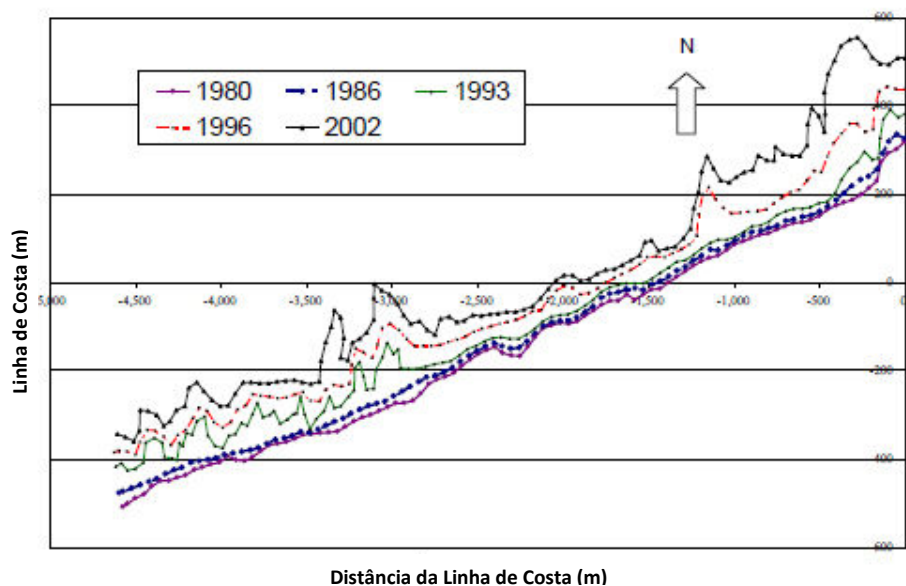


Figura 4 - Erosão (em m) da linha de costa em Bangkuntien de 1980 a 2002, adaptado de Ekphisutsuntorn *et al.* (2010).

Os resultados da simulação apresentam a estimativa da erosão para os anos de 1996, 2002 e 2028. Na Figura 5 a linha violeta representa a linha de costa em 1996, a linha verde representa a situação em 2002 e a linha vermelha apresenta a previsão para 2028. Verifica-se que a erosão ocorre mais rapidamente nas zonas I e III, com maior impacto na zona III.

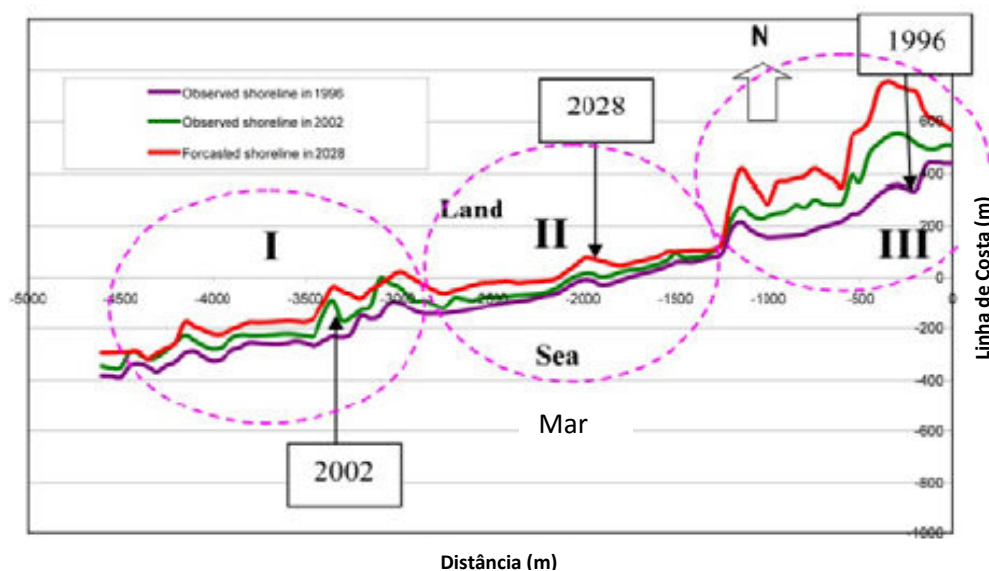


Figura 5 - Simulação da linha costeira de Bangkhuntien em 2028 a partir do modelo Genesis, adaptado de Ekphisutsuntorn *et al.* (2010).

As simulações para os anos de 1996 e 2002 corresponderam aproximadamente com os dados reais observados, permitindo concluir que se pode utilizar o modelo GENESIS na previsão da

evolução da linha de costa para os cerca de 20 anos estipulados neste estudo. O modelo não contém diretamente processos perpendiculares à costa (*cross-shore*) e simula a erosão de forma correta, indicando, assim, que os processos litorais (*alongshore*) são dominantes na erosão costeira que se verifica em Bangkhuntien.

- **LITMOD**

O modelo LITMOD foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC, 1990). A sua formulação é semelhante à do GENESIS, tendo sofrido diversas atualizações por necessidades específicas da sua aplicação em casos de estudo (Vicente e Clímaco, 2003).

Este modelo tem dois princípios base. Considera, por um lado, a não existência de alteração do perfil da linha de costa para processos de erosão ou acreção, verificando-se apenas avanços ou recuos paralelos ao perfil, ainda que seja reconhecido que as perturbações de determinadas obras de defesa alteram o perfil das praias. No entanto, este parâmetro não entra na metodologia da simulação. Por outro lado, o modelo define como fator principal de evolução o transporte sedimentar (Vicente e Clímaco, 2003).

O processo de simulação depende das condições iniciais da linha de costa e dos caudais de sólidos verificados nas células das extremidades. Poderão ainda ser adicionados/subtraídos caudais de alimentação, que em caso negativo significam remoção de areia. São considerados outros parâmetros de entrada que caracterizam a agitação da batimetria de aproximação, sendo necessária a aplicação de um modelo de refração ou de refração e difração às características da onda (período, altura e rumo). É possível definir diferentes valores de agitação na batimetria de aproximação em diversos pontos para obter o respetivo valor na rebentação (Vicente e Clímaco, 2003). Segue-se a descrição de um caso de estudo em que foi utilizado o LITMOD como ferramenta de apoio à decisão de intervenção na praia de Porto Santo.

- ***Manutenção e Melhoramento da Praia de Porto Santo (Clímaco et al., 2005).***

Este estudo tinha por objetivo caracterizar a vulnerabilidade da praia de Porto Santos aos agentes naturais e à ocupação humana e apresentar propostas de medidas e intervenções para a manutenção e melhoramento da praia. A metodologia constou da caracterização das condições naturais, nomeadamente, areia, marés, morfologia e ocupação populacional. Posteriormente foram simulados 3 cenários de alimentação artificial ($0,5 \text{ Mm}^3$, $0,75 \text{ Mm}^3$ e 1

Mm³) e um de alimentação artificial (0,55 Mm³) com um esporão de contenção e foi determinada qual a melhor solução.

A praia de Porto Santo fica situada na ilha da Madeira, oceano Atlântico (Figura 6). A praia apresenta areias finas com granulometria bastante homogênea, com marés do tipo semidiurno regular. Os ventos são predominantes de Oeste (W) e Oeste-Noroeste (WNW), e os regimes de onda são suaves, com alturas significativas inferiores a 1 metro.

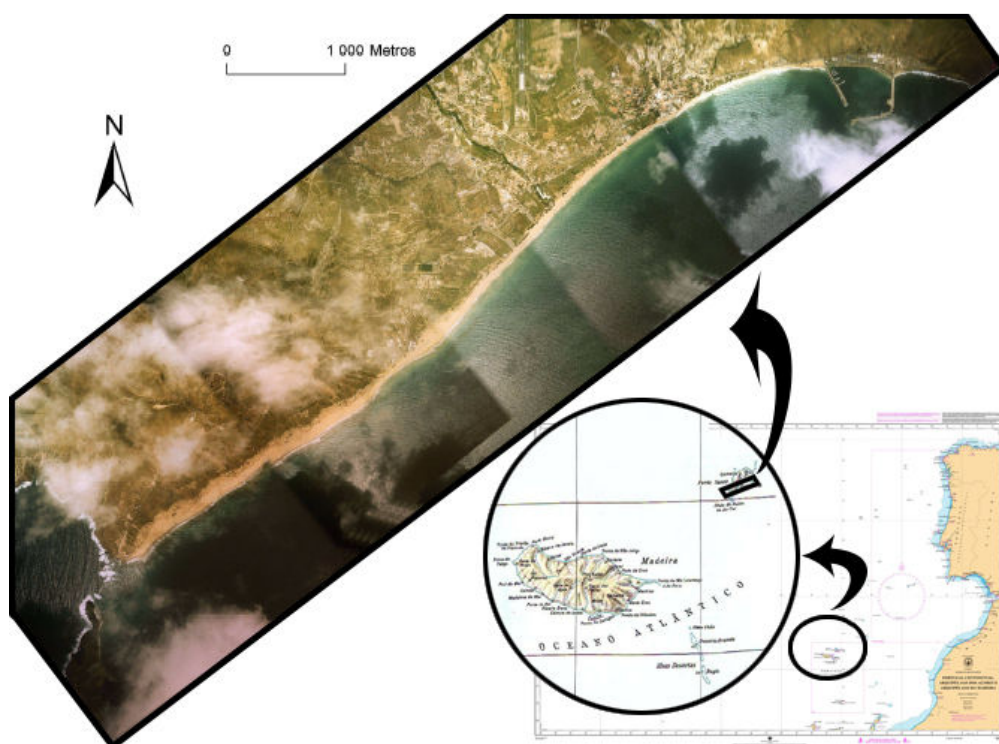


Figura 6 - Ilha de Porto Santo, Madeira. Adaptado de Clímaco *et al.* (2005).

Foi também caracterizada a evolução morfológica da praia entre 1976 e 2003 (ver Figura 7), revelando neste período uma perda global de areia de 0,35 Mm³ resultante do balanço dos volumes de erosão (0,7 Mm³) e de acreção (0,35 Mm³). Verificou-se então que o trecho Este é o mais afetado pelos dois fenómenos simultaneamente (maior erosão e maior acreção), resultado da construção do porto marítimo. O trecho central é o menos afetado pela erosão. A análise do Plano de Ordenamento local evidencia o aumento da pressão sobre a orla costeira da praia, destacando-se as construções urbanas da frente marítima da Vila da Baleira e o

porto, além da regularização dos ribeiros que desagüam na praia para controlo da erosão das bacias hidrográficas, provocando a redução do transporte sedimentar.

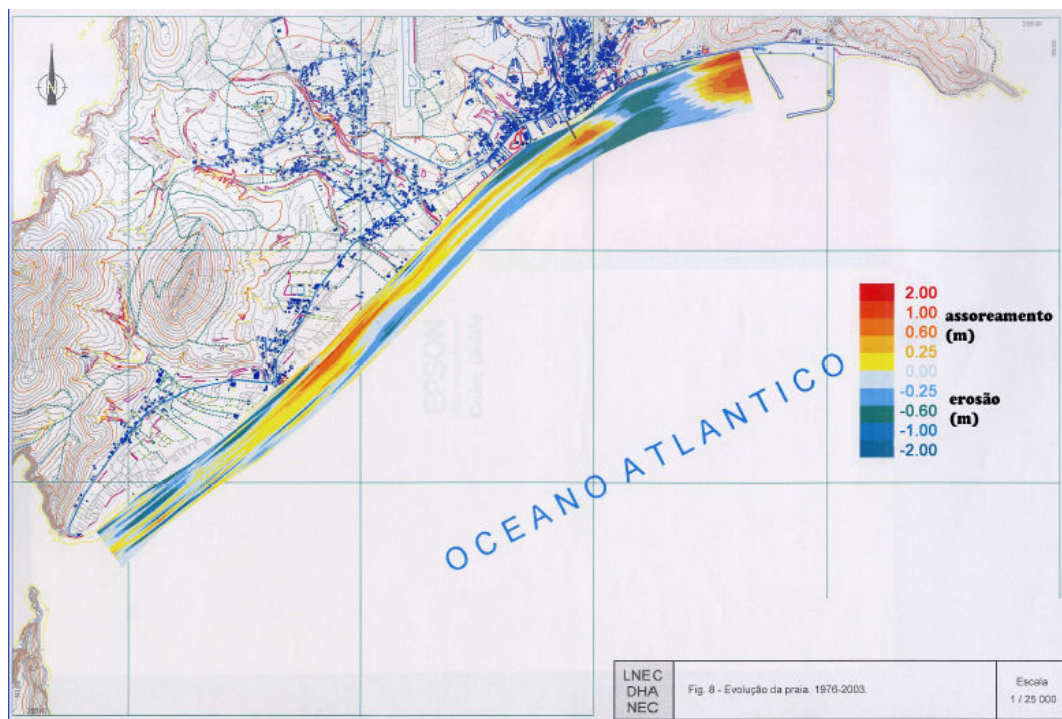


Figura 7 - Evolução morfológica da praia de Porto Santo (1976-2003) (Clímaco *et al.*, 2005).

Para a simulação pretendida, modelou-se a evolução morfológica da praia entre 1976 e 2003, com dados de agitação marítima para 6 anos, e repetição destes até perfazer 20 anos de evolução. Foram definidos 3 cenários de alimentação artificial ($0,5 \text{ Mm}^3$, $0,75 \text{ Mm}^3$ e 1 Mm^3) e um de alimentação artificial ($0,55 \text{ Mm}^3$) com um esporão de contenção.

A análise das simulações (ver Tabela 2) permitiu verificar o alargamento da praia (em metros) em 4 pontos de referência, nomeadamente, no extremo Oeste da zona de alimentação, ponte-cais, a 450 metros a Este da ponte-cais e no extremo Este da zona de alimentação. O controlo de resultados foi efetuado após 6 meses, 10 e 22 anos da alimentação artificial.

Os resultados mostram-se regulares, na medida em que volumes maiores produzem alargamentos maiores e relativamente estáveis. O aumento verifica-se crescente no sentido Oeste-Este. A colocação do esporão no extremo Este da alimentação permitiu aumentar a eficácia do alargamento, impedindo a fuga de sedimentos para Este.

Tabela 2 - Situações de alargamento da praia após o início do enchimento (m) (Clímaco *et al.*, 2005)

Local	SITUAÇÕES DE ALARGAMENTO DA PRAIA APÓS O INÍCIO DO ENCHIMENTO (m)											
	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3			Alternativa 4		
	(500 000 m ³)			(750 000 m ³)			(1 000 000 m ³)			(550 000 m ³ com esporão)		
	6 meses	10 anos	22 anos	6 meses	10 anos	22 anos	6 meses	10 anos	22 anos	6 meses	10 anos	22 anos
Extremo W da zona de alimentação	34	16	9	50	27	18	67	37	28	35	17	12
Ponte-Cais	36	24	14	54	39	26	72	54	38	37	27	27
450 m a E da Ponte-Cais	36	27	21	54	42	33	72	56	44	38	37	35
Extremo E da zona de alimentação	34	22	26	51	33	36	67	43	47	45	33	34
Média	35	22	18	52	35	28	70	48	39	39	29	27

Após comparação de resultados, concluiu-se que a alternativa 2 (0,75 Mm³) seria a mais recomendada, por provocar um alargamento suficiente que compensa a erosão verificada, por proteger o contorno das obras marginais na frente da Baleira e proporcionar boas condições balneares para as próximas décadas. A utilização de esporão, apesar da boa resposta na retenção de sedimentos, foi considerada desnecessária, exceto se houvesse dificuldade na obtenção de areias com características adequadas às já existentes. Para a solução recomendada obtiveram-se alargamentos médios, para o trecho de 1,5 km alimentado, de cerca de 30 m.

- **LTC (Long Term Configuration)**

O LTC (Long Term Configuration) é um modelo que permite a projeção de cenários de evolução de linha de costa. Permite apoiar a escolha de soluções de engenharia em questões económicas, técnicas e socioeconómicas, para matérias de natureza de defesa costeira. O modelo encontra-se desenhado para praias arenosas e admite-se que o transporte de sedimentos está sujeito a diversos parâmetros naturais, nomeadamente ondas, correntes, ventos, níveis de águas e tipologia dos sedimentos, permitindo ainda definir condições fronteira na área modelada, de modo a condicionar as alterações provocadas na zona costeira. (Coelho, 2005). No capítulo 3.1 é efetuada uma descrição mais completa sobre o seu funcionamento, uma vez que foi o modelo utilizado neste estudo. Segue-se a descrição de um

caso de estudo em que o LTC aplicado à alimentação e transposição artificial de areia na barra de Aveiro.

- ***Artificial Nourishment And Sand By-Passing In The Aveiro Inlet, Portugal – Numerical Studies (Coelho et al, 2010).***

O objetivo deste estudo era avaliar o impacto de dois tipos de sistemas de alimentação artificial de areia na barra de Aveiro (alimentação artificial e transposição de areia), através da aplicação de um modelo numérico, o LTC. A metodologia utilizada passou pela caracterização da área de estudo, nomeadamente, condições das ondas (altura, direção e período), granulometria dos sedimentos, volumes de transporte sedimentar, batimetria e topografia. Avaliação de dois tipos de alimentação artificial: alimentação contínua de areia (transposição de areia) e alimentações periódicas de areia (alimentação artificial). O modelo LTC foi aplicado num cenário de referência e em cenários alternativos com diferentes volumes de areia, morfologia e localização das intervenções.

A barra de Aveiro localiza-se a Noroeste (NW) da costa portuguesa (ver Figura 8), com regime de onda tipicamente de Noroeste (NW), altura de onda significativa de 2 metros e período de 12 segundos. O potencial de transporte litoral varia entre 1 a 2 Mm³/ano. Ao longo da costa, o transporte sedimentar encontra-se alterado pela existência de esporões.

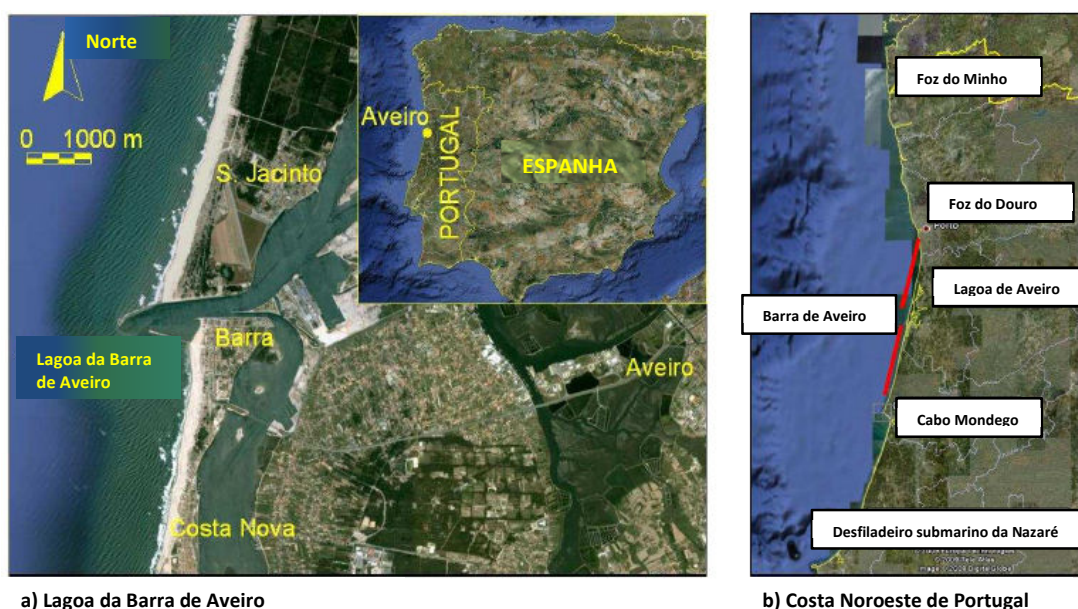


Figura 8 - Localização da área de estudo, adaptado de (Coelho et al., 2010).

Devido às incertezas produzidas pelo modelo, torna-se necessário definir uma situação de referência, para permitir a comparação com diversos cenários de alimentação artificial. Foi utilizado um regime de onda constante, com altura de 1,5 metros e direção 65º Norte.

Definiram-se perfis de controlo distanciados 6,5 km entre si, estando colocados imediatamente a barlar e a sotamar das obras de defesa costeira. O controlo de resultados foi efetuado após 1, 2, 5, 10, 20 e 50 anos de simulação. Foi aplicada a fórmula CERC (1984) com coeficiente de calibração K, de 0,05.

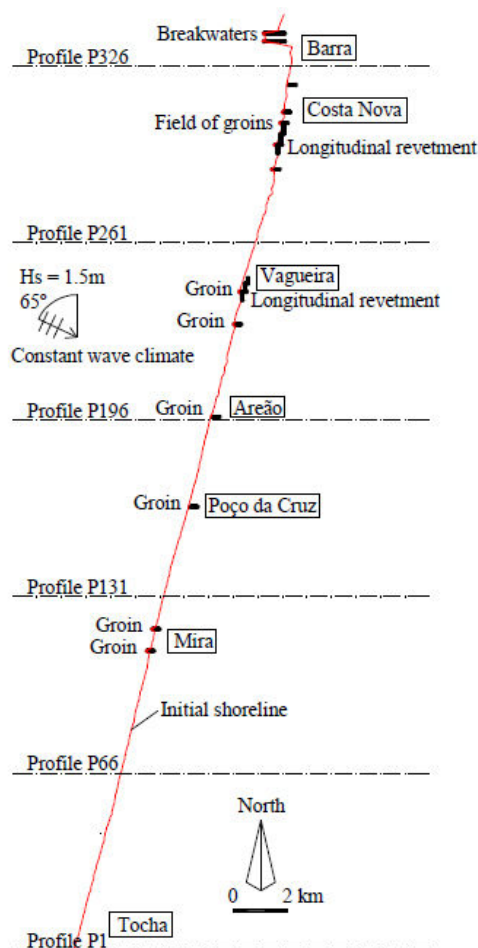


Figura 9 - Representação da área de referência modelada com as características da ondulação e estruturas de defesa costeira (Coelho *et al.*, 2010).

Os cenários de alimentação testados divergiram no volume adicionado, no tempo de operação das alimentações, na variação da extensão longitudinal e transversal da área de alimentação e na variação da localização e dimensão da alimentação.

De um modo geral, os resultados mostraram que as alimentações artificiais promovem impactos positivos no comportamento da linha de costa, reduzindo os níveis de recuo da linha de costa verificados no cenário de referência. Em todos os testes verificaram-se efeitos imediatos no perfil 326 (o mais próximo da zona de intervenção), sendo que os efeitos se vão desvanecendo ao longo dos anos, transferindo-se para os perfis mais a sul.

Aveiro apresenta-se como um local interessante para a aplicação do sistema de transposição de areias, pelos sedimentos acumulados pelo esporão da barra. No entanto, devido aos custos deste tipo de intervenção, são recomendadas como alternativa as alimentações artificiais periódicas.

Trata-se de um tipo de operação que requer um estudo adequado, não só na análise dos volumes necessários e disponíveis, que se traduzem em custos financeiros, mas também na análise do impacto social, já que se trata de um tipo de operação que é imediatamente avaliada pelo consumidor final. A alimentação artificial ajuda a mitigar os efeitos erosivos costeiros e a modelação numérica revela-se como uma ferramenta útil na estimativa e melhoria da performance desta e doutras obras de defesa costeira.

Os resultados mostram que a alteração de variáveis como o volume, tempo operação, extensão da área de alimentação e a sua localização, têm comportamentos semelhantes com o tempo, revelando impactos junto do perfil próximo da alimentação nos primeiros cerca de 20 anos, sendo depois esses efeitos distribuídos pelos perfis mais a Sul.

No estudo de linhas de costa abertas, é fundamental a definição de objetivos claros para a alimentação artificial, com descrições exatas de localização e tempos de alimentação, de modo a otimizar a conceção de projetos mais eficazes.

Resumo e comparação das potencialidades e limitações dos modelos

Os modelos anteriormente descritos, uma vez que partilham finalidades semelhantes (simulação de cenários de evolução de linha de costa), podem ser agrupados de acordo com algumas características comuns, em termos das potencialidades ou das limitações que apresentam.

Potencialidades (adaptado de Coelho (2005))

Os três modelos, GENESIS, LITMOD e LTC, permitem a simulação de um número quase ilimitado de esporões, incluindo esporões de forma composta (T, Y, etc.), quebra-mares, quebra-mares destacados, revestimentos longitudinais, alimentações artificiais e dragagens e também, a transposição de areia em torno dos esporões ou permeabilidade através deles.

Os modelos GENESIS e LITMOD permitem a modelação simples da evolução transversal dos perfis em erosão ou acreção, ao admitir que o perfil ativo mantém sempre a mesma forma. O GENESIS e LTC possibilitam a introdução de ondas ao largo, com diferentes alturas, períodos e

direções e a verificação da difração devida a esporões, quebra-mares ou quebra-mares destacados. O LITMOD e o LTC apresentam versatilidade de introdução de condições nas fronteiras da área modelada, com base em expressões de cálculo dos caudais sólidos (LITMOD) ou extrapolação dos caudais sólidos (LTC).

Em termos das potencialidades que distinguem cada modelo, o GENESIS, possibilita a introdução de múltiplos trens de ondas, simulando proveniências independentes. O LITMOD permite a definição da forma do perfil transversal através de pares de pontos coordenados. Definição de numerosos regimes locais de ondas ao longo de uma batimetria de aproximação e transformação desses dados para valores na rebentação e pode utilizar dados de agitação marítima sob a forma de séries cronológicas. O LTC possibilita a tradução das diferenças de evolução para além dos limites do perfil ativo, em função de diferentes características topográficas. Possibilita também a variação dos níveis de água por efeito da maré ou subida do nível do mar.

Limitações (adaptado de Coelho (2005))

No que diz respeito às limitações apresentadas pelos modelos, o GENESIS e LITMOD não traduzem as diferenças topográficas que possam existir para além dos limites do perfil ativo, e a permeabilidade dos esporões é de difícil quantificação. O GENESIS e LTC não incluem a reflexão das ondas em estruturas. No LITMOD e LTC verifica-se a necessidade de conhecer as características reais, usualmente de difícil quantificação.

O modelo GENESIS apresenta ligeiras condicionantes na posição, forma e orientação das estruturas. Não estabelece relação direta com a variação do nível de maré, que apenas pode ser representada por variações nos dados de ondas. Não admite o desenvolvimento de tômbolos, já que a linha de costa não pode alcançar quebra-mares destacados. Não estabelece relação direta com a variação do nível de maré, que apenas pode ser representada por variações nos dados de ondas.

No modelo LITMOD não são indicadas condicionantes nas formas ou posição das estruturas. É necessário proceder à transformação dos dados de onda ao largo para dados na batimetria de aproximação, recorrendo a um modelo matemático bidimensional de propagação de ondas. Não estabelece relação com os níveis de maré.

O modelo LTC apresenta condicionamentos na posição e forma das estruturas pela grelha de pontos definida. Ocorre um tratamento muito simplificado da difração. Possui limitações

inerentes ao atual conhecimento do fenómeno de transposição de areias em esporões. Não inclui o efeito das correntes originadas pelas marés, no transporte sólido. E a distribuição transversal do transporte longitudinal é admitida constante ao longo de todo o perfil ativo de cada onda, independentemente do tipo de rebentação da onda.

2.2 Análises custo-benefício da proteção costeira

De modo a integrar as diversas metodologias apresentadas anteriormente, vários autores concretizaram estudos que contemplam os custos e respetivos benefícios, económicos e/ou ambientais de diferentes estruturas de defesa costeira. Foram selecionados alguns estudos que abordam metodologias diferentes na análise aos impactos da erosão e proteção costeira.

- ***Evaluation of Coastal Defence Strategies in Portugal (Taborda et al., 2005).***

O objetivo principal do estudo era efetuar uma análise custo-efetividade a nível local e global, de duas estratégias de proteção costeira: construção de campos de esporões e alimentação artificial de praias. A metodologia utilizada passou pela caracterização dos casos de estudo Quarteira/Vale do Lobo e Costa Nova/Vagueira (Figura 10) e estimativa de custos das intervenções de proteção costeira: esporões e alimentação artificial de areia.

Foram então considerados dois casos de estudo, o primeiro, Quarteira/Vale do Lobo, caracteriza-se pela elevada erosão que ocorre nas arribas que rodeiam a praia e constituem a principal fonte dos sedimentos que são transportados ao longo da costa. Atualmente, o campo de esporões da Quarteira encontra-se com 6 esporões, com comprimentos de 100 m a 140 m, distribuídos por 1.500 metros de linha de costa. O segundo caso de estudo, Costa Nova/Vagueira, apresenta uma zona costeira linear pouco arenosa e bastante exposta à ondulação muito energética do Atlântico. É uma região muito afetada pela erosão e a construção de esporões no Porto de Aveiro veio potenciar o recuo da linha de costa a sul destas estruturas. No presente existem 7 esporões e cerca de 2 km de proteções aderentes.

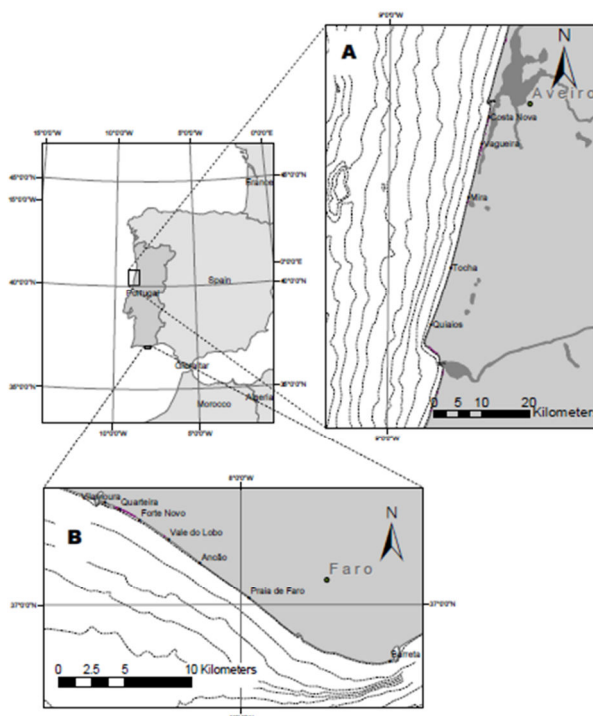


Figura 10 - Localização dos casos de estudo: A) Costa Nova/Vagueira; B) Quarteira/Vale do Lobo (Taborda *et al.*, 2005).

A determinação de custos no caso de Quarteira/Vale do Lobo teve por base outros trabalhos realizados no Algarve, bem como dados da literatura, permitindo obter para os esporões com horizonte de projeto a 50 anos, a estimativa de custo de 6000 €/m (construção e manutenção consideradas), equivalendo a um custo médio de 120 €/m de linha de costa/ano. Dada a importância do turismo na região, a decisão política passou pela alimentação artificial das praias. Uma primeira estimativa apontou para o custo unitário de alimentação artificial de areia de 2,5 €/m³, no entanto, o valor da empreitada fixou-se em 4 €/m³. Assim, a intervenção foi realizada com a deposição de 0,6 Mm³ ao longo de 1.400 m, com o custo total de 2,4 M€. Considerando a extensão da costa, o custo médio da alimentação artificial seria de 180 €/m de linha de costa/ano. No entanto, dado que a areia da alimentação vai protegendo diversas regiões ao longo do tempo, estes custos são diluídos quando se considera uma extensão maior, para valores entre 50 €/m/ano (trecho de 5 km) e 12,5 €/m/ano (trecho de 20 km), representando, deste modo, custos inferiores à construção dum campo de esporões.

Os custos estimados no caso da Costa Nova/Vagueira, também admitiram valores de outras intervenções realizadas na região, nomeadamente, de dois esporões de 220 m construídos na Costa Nova, com o custo total de 2 M€ cada um. Projetando a intervenção a 50 anos, o custo estimado seria de 9.000 €/m de estrutura ou 180 €/m linha de costa/ano. Dado o ambiente

muito energético, o custo de alimentação artificial estimado também será mais elevado que no caso de estudo anterior, situando-se em 3 €/m³ (Quarteira - 2,5 €/m³). Considerando trechos de 5 km, 20 km e 50 km, os custos de proteção determinados foram de 600 €/m/ano, 150 €/m/ano e 60 €/m/ano, mostrando que para extensões longas, a alimentação artificial apresenta-se como uma solução mais viável economicamente.

Conclui-se, então, que nos dois casos de estudo, Quarteira/Vale do Lobo (litoral pouco energético) e Costa Nova/Vagueira (litoral muito energético), a alimentação artificial revelou ser a solução económica mais eficaz. No segundo caso de estudo, a alternativa campo de esporões apenas se consideraria mais atrativa economicamente se fosse considerado apenas um pequeno trecho da costa.

Os resultados mostraram que mesmo em costas muito energéticas, em que existem taxas elevadas de transporte de sedimentos, a alimentação artificial surge como um método de intervenção preferencial, tanto pelo aspeto económico como ambiental. Uma vez que este estudo apenas considera os custos diretos de construção e manutenção, caso se estimassem outros custos associados e os benefícios respetivos, provavelmente, a alimentação artificial obteria um rácio custo-benefício melhor que as soluções rígidas.

- ***A cost–benefit appraisal of coastal managed realignment policy (Turner et al., 2007).***

Este estudo tinha como principal objetivo analisar a viabilidade de cenários de gestão de realinhamento da costa em detrimento de políticas de construção de estruturas de defesa. Da metodologia adotada constou a caracterização do estuário de Humber, definição de cenários alternativos de gestão de realinhamento costeiro em detrimento de estratégias de retenção-de-linha e aplicação duma análise custo-benefício como ferramenta de auxílio ao processo de decisão. A determinação do nível de diferentes impactos foi obtido através duma análise de sensibilidade ao estudo.

O estuário de Humber situa-se no Reino Unido, e compreende uma área maioritariamente dedicada à agricultura, ainda que exista alguma área de habitação, comércio e indústria (Figura 11).

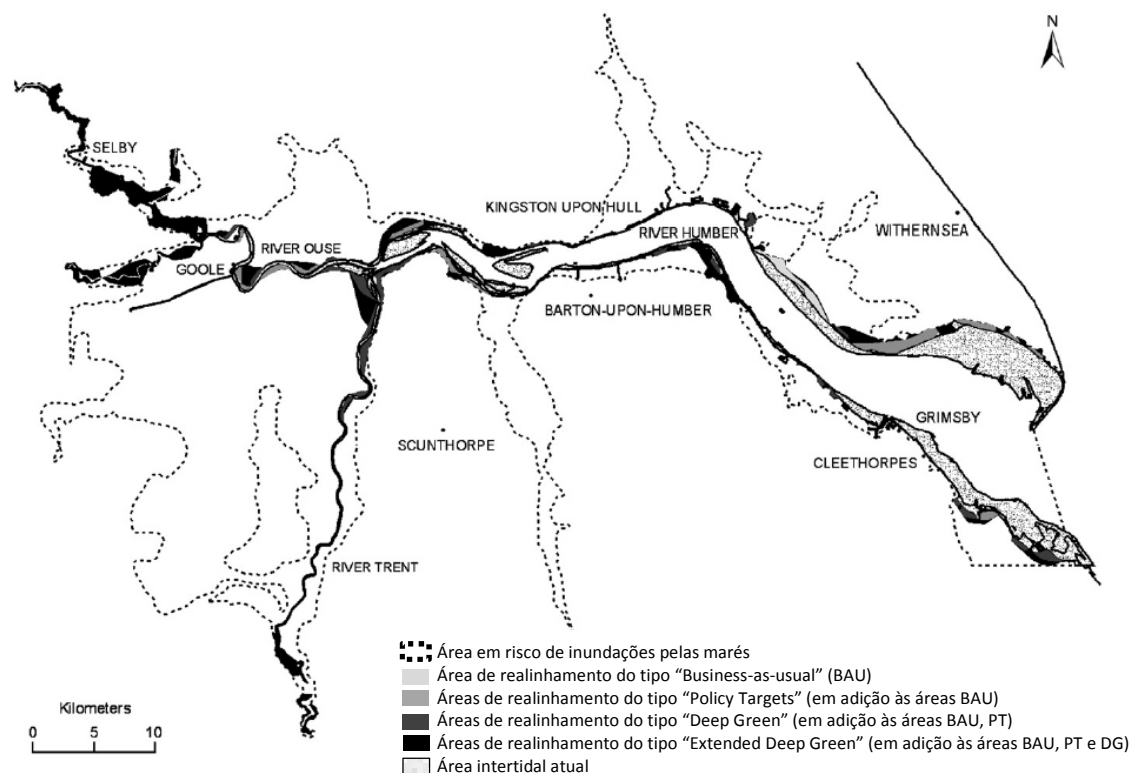


Figura 11 - Áreas elegíveis para implementação dos cenários propostos no estuário de Humber, adaptado de Turner *et al.* (2007).

O modelo custo-benefício do realinhamento costeiro foi definido através da diferença entre os custos e benefícios descontados de cada cenário, com os custos descontados da estratégia comum de retenção-de-linha, para obtenção do valor atual líquido.

Os resultados apresentam o resumo dos custos e benefícios associados ao realinhamento. Posteriormente é calculado o valor atual líquido após 25, 50 e 100 anos, para os 5 cenários, e para alternativas que misturam diversos cenários, com uma taxa de desconto em declínio ao longo do tempo (em vez de utilizar uma taxa de desconto fixa). A análise de sensibilidade foi efetuada através da determinação do ano em que o NPV era nulo aplicando variações da taxa de desconto, igualando custos de manutenção de estruturas e diminuindo em 50%, e aumentando os benefícios, nomeadamente o valor por área de habitação e por tonelada de carbono sequestrado.

Concluindo, o método de CBA tradicionalmente usado para projetos em zonas costeiras não é apropriado para a elaboração de estratégias de gestão mais flexíveis. As escalas temporais e espaciais para as quais a análise é conduzida, impõe restrições à CBA e leva a que se façam alterações ao método. Este estudo vem realçar a importância da abordagem de transferência de benefícios na medida em que os valores aplicados são determinantes para que haja um

grau de confiança suficiente para a implementação de políticas. Os resultados positivos obtidos devem ser avaliados conjuntamente com princípios e práticas numa abordagem integrada de gestão costeira.

- ***Coastal Erosion and Coastal Defense Interventions: a Cost-Benefit Analysis (Roebeling et al., 2011a).***

O objetivo deste estudo era realizar uma análise custo-benefício a diversas estruturas de defesa costeira. A metodologia adotada passou pela simulação da evolução da linha de costa com o modelo LTC (Coelho, 2005), a utilização duma abordagem de transferência de benefícios para definição do valor dos ecossistemas costeiros (Brower, 2000), e avaliação dos custos e benefícios de uma variedade de tipos, localizações e combinações de opções de investimento de proteção costeira.

O estudo foi aplicado à região litoral no Centro de Portugal, entre a zona da Barra e da Mortinheira, cuja caracterização se encontra anteriormente neste documento no capítulo 2.1 (Coelho *et al.*, 2010) e na Figura 9. Foram determinados os custos de investimento e intervenção de três tipos de obra de defesa costeira: esporões, revestimentos longitudinais e alimentações artificiais (não necessitam de manutenção) e analisados os benefícios das áreas protegidas com base no uso do solo (CLC 2006).

Foram definidos três cenários para cada obra de defesa, fazendo variar o seu comprimento/volume, e determinadas as áreas não perdidas após 10, 30 e 50 anos. Posteriormente foram utilizados dois parâmetros económicos para caracterizar cada resultado, o valor atual líquido e a taxa interna de retorno.

Os resultados mostraram que, do ponto de vista físico, todos os cenários contribuem para a diminuição da área perdida face ao cenário de referência, não conseguindo no entanto parar os efeitos da erosão. As alimentações artificiais e os revestimentos longitudinais são os mais eficazes a minimizar a erosão e a aumentar as áreas de acreção. Este fenómeno ocorre com maior incidência se as intervenções forem colocadas mais a Norte, visto o transporte de sedimentos dar-se principalmente no sentido Norte-Sul.

Do ponto de vista económico, a construção de novos esporões apresenta-se como a solução menos viável, por outro lado, alimentações artificiais, revestimentos longitudinais e extensão de esporões já existentes, destacam-se como investimentos com bom potencial de retorno. As alimentações artificiais apresentam a vantagem de se tratar de um investimento único, já que

não requer manutenção, e de mostrar bons resultados de área não perdida por um longo período de tempo.

Este estudo permite concluir que qualquer intervenção infere melhorias em termos de área não perdida, no entanto, economicamente a avaliação sugere respostas diferentes e mostra que a construção de novos esporões não será a melhor alternativa. Por outro lado a implementação de alimentações artificiais, obras de revestimento longitudinal e a extensão de esporões, revelam-se mais interessantes. Este estudo mostra que, à parte do investimento, é importante proteger a costa, visto que os benefícios da área não perdida serão maiores que os custos que estão associados à proteção.

2.3 Estudos económico-ambientais da erosão e proteção costeira

A análise económico-ambiental parte da integração de dados biofísicos com o valor dos ecossistemas de acordo com o uso do solo. O estudo do impacto das alterações climáticas na subida do nível do mar, promoveu a criação de diferentes metodologias que avaliam os custos e os benefícios da proteção costeira a diferentes escalas.

Hinkel e Klein (2003) desenvolveram um modelo dinâmico e interativo para avaliar a vulnerabilidade costeira (DIVA), que por um lado ultrapassasse as limitações apresentadas por outros modelos, nomeadamente, fontes de dados obsoletas, nível do mar como única variável climática na determinação da vulnerabilidade costeira, abordagens estáticas de apenas um cenário de subida instantânea do nível do mar e a definição arbitrária de dados relativos ao desenvolvimento socioeconómico. Por outro lado, o DIVA surge com dois desafios importantes, ser projetado e estar disponível para uma vasta comunidade de utilizadores e ser desenvolvido por grupos de cientistas distribuídos geograficamente. O primeiro desafio passava por obter uma interface amigável e um modelo eficiente. O segundo desafio implicou uma abordagem inovadora, atribuindo a cada parceiro do consórcio DINAS-COAST o desenvolvimento de um módulo representando subsistemas naturais e sociais que seriam posteriormente integrados no modelo.

A ferramenta DIVA assenta em três componentes principais, uma base de dados costeira, um modelo integrado baseado em conhecimento das ciências naturais e sociais em subsistemas costeiros e uma interface gráfica para seleção dados e cenários, corrida de simulações e análise de resultados.

A evolução do DIVA (Hinkel e Klein, 2009) permitiu o aumento do número de módulos disponíveis, sendo atualmente nove, o aumento relativo do nível do mar, efeitos dos rios, erosão indireta, erosão total, alterações em zonas húmidas, inundações, avaliação de zonas húmidas, turismo e custos e adaptação.

Esta metodologia tem sido utilizada no âmbito do estudo das alterações climáticas, nomeadamente por (Costa *et al.*, 2009), na avaliação de custos e benefícios na adaptação de países costeiros da União Europeia à ameaça da subida do nível do mar. A determinação dos custos totais parte da soma entre os custos associados a perdas naturais e sociais (p.e., área perdida, imigração) e os custos associados à construção de obras de defesa costeira. Os benefícios teóricos das medidas de adaptação são obtidos pela diferença entre os impactos evitados (cenário de referência vs. Cenário de adaptação) e os custos de adaptação (custos de construção novas estruturas vs. custos de manutenção do cenário de referência). Os custos totais per si não representam o nível de vulnerabilidade de um país, na medida em que este índice estará relacionado com a capacidade económica do país em executar as medidas de adaptação necessárias à proteção da costa.

Roebeling *et al.* (2011b) avaliaram a evolução da erosão costeira na Europa e o valor dos ecossistemas. A metodologia constou duma análise histórica (1975-2006), com informação do inventário CORINE Land Cover (Bossard *et al.*, 2000), e duma projeção futura (1976-2050), através do modelo DIVA (Hinkel e Klein, 2009, Ionescu *et al.*, 2009). Foi ainda complementada por uma abordagem de transferência de benefícios (Costanza *et al.*, 1997, Martinez *et al.*, 2007), mostrando não só a importância económico-ambiental da zona costeira na Europa, mas também a extensão dos ecossistemas perdidos no passado e os que possivelmente serão perdidos no futuro.

À escala regional, numa abordagem económico-ambiental às alterações climáticas, Bosello *et al.* (2007) utilizam uma metodologia diferente, avaliando as áreas perdidas e os custos de proteção através da base de dados do modelo de avaliação integrada de alterações climáticas FUND (Climate Framework on Uncertainty, Negotiation and Distribution), e posteriormente é utilizado o GTAP-EF (modelo estático computacional de equilíbrio geral; CGE), para simular os efeitos de equilíbrio na economia mundial. Dois outros estudos apresentam metodologias semelhantes. Deke *et al.* (2001) aplicam o modelo DART (multi-regional, multi-sectorial e dinâmico) para estimar os impactos económicos da subida do nível do mar, no entanto, restringem o estudo aos custos de proteção costeira, ignorando o valor da área perdida e as consequências económicas. Darwin e Tol (2001), por sua vez, utilizam o modelo estático FARM

(Future Agricultural Resources Model), com dados relativos à produção nacional e à exportação e efetuam uma comparação entre o método de determinação de custos diretos e o método de variações equivalentes. Roson (2003) reuniu informação sobre o estado de arte dos modelos de avaliação integrada (IAM), concretizando no seu estudo a combinação dos modelos GTAP e G-Cube (McKibbin e Wilcoxon, 1998) e IMAGE (IMAGE-team, 2001), e à avaliação de diversos parâmetros nos impactos provocados pelas alterações climáticas. Tol (2002) estimou o impacto económico das alterações climáticas para diversas regiões a nível mundial, através do estudo individual de parâmetros sociais, económicos e naturais. Estas estimativas resultaram de estudos globais e consistentes usando cenários baseados em modelos GCM (General Circulation Models).

Fankhauser (1994) analisou a relevância dos custos de proteção e mitigação dentro dos custos totais associados às alterações climáticas, nomeadamente, na subida do nível do mar. A eficiência económica requer que os custos de proteção sejam definidos de modo a que o somatório dos custos de proteção com os danos por área perdida seja minimizado. Partindo de equações diferenciais de primeira ordem é determinado o nível ótimo de proteção, de acordo com a importância relativa da área seca perdida comparada com os custos da perda de áreas húmidas e respetivos custos de proteção.

Capítulo 3 – Abordagem

A análise económico-ambiental aplicada no desenvolvimento desta tese seguiu, de forma resumida, a utilização do modelo numérico de simulação LTC, seguido da determinação dos custos da alimentação artificial de praias e determinação dos benefícios de áreas de praias e dunas e áreas urbanas protegidas, sobre os quais foi realizada uma análise custo-benefício e otimização dinâmica (ver Figura 12).

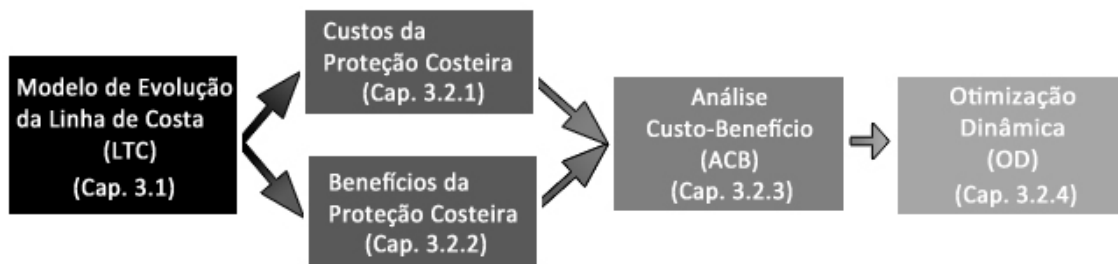


Figura 12 - Esquema da abordagem utilizada no desenvolvimento da tese e distribuição por capítulos.

3.1 Modelo de evolução da linha da costa

O LTC (Long-Term Configuration) pretende avaliar a evolução da morfologia da zona costeira a larga escala, através da análise de parâmetros relacionados com o transporte de sedimentos apresentando, no entanto, um elevado grau de incerteza (Coelho, 2005).

À semelhança dos modelos anteriormente referidos (GENESIS (Hanson *et al.*, 1991) e LITMOD (Vicente *et al.*, 2004)), o LTC tem por base o balanço de volumes, considerando a equação de continuidade (equação 1) para os volumes de areia de cada processo.

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \left(\frac{\partial Q}{\partial y} + q_{ext} \right) dt \quad (\text{Eq. 1})$$

Assim, tem-se que a variação do volume de areia (∂V) distribuído por um comprimento infinitesimal (∂y) é igual à variação do caudal sólido (∂Q) a ser transportado, ao qual se soma ou subtrai quaisquer caudal sólido exterior (q_{ext}) (fontes aluvionares, alimentações artificiais, dragagens, extrações de areia, etc), num determinado instante de tempo (dt) (Coelho, 2005).

Definindo intervalos de tempo (Δt) e de espaço (Δy), é possível encontrar uma relação entre a variação de volume e a variação no tempo do caudal de sólidos (equação 2):

$$\Delta V = (Q_i - Q_{i-1} + Q_{ext})\Delta t = (\Delta Q + Q_{ext})\Delta t \quad (\text{Eq. 2})$$

Tem-se que $Q_{ext} = q_{ext} \Delta y$ e que há uma distribuição uniforme da variação do volume de areia (ΔV) no comprimento Δy em toda a largura ativa do perfil transversal, verificando-se uma variação na cota dos pontos do perfil igual a Δz . Deste modo, o cálculo das modificações ao perfil transversal pode ser efetuado através da equação 3 (Coelho, 2005):

$$\Delta z = \frac{\Delta V}{(\text{Largura ativa})\Delta y} \quad (\text{Eq. 3})$$

Nos modelos de uma linha, qualquer ponto do perfil ativo é suficiente para caracterizar a alteração da posição da linha de costa. No modelo LTC varia-se uniformemente as cotas dos pontos situados no perfil ativo, mas ajusta-se o perfil ativo com as zonas adjacentes, pelo que, a variação da posição da linha de costa dependerá de Δz , mas também da batimetria e topografia associadas a cada perfil transversal (Coelho, 2005). A Figura 13 apresenta a principal diferença entre os modelos de uma linha e o LTC.

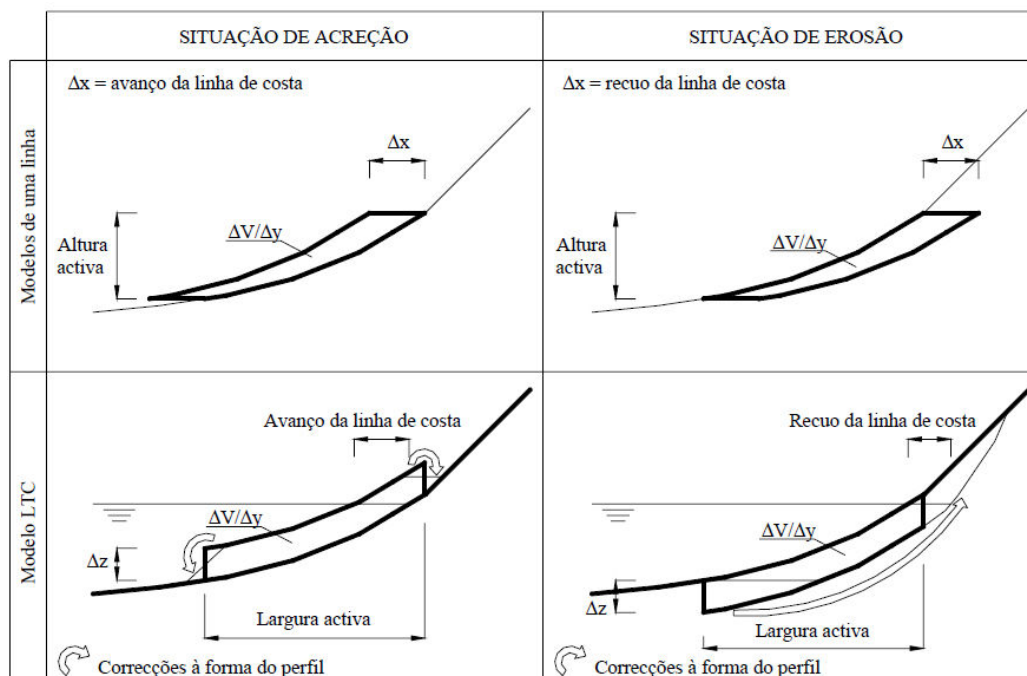


Figura 13 - Esquema da formulação de base nos modelos de uma linha e no modelo LTC (Coelho, 2005).

Na representação de um cenário de acreção em que a inclinação do talude a calcular é superior ao ângulo de atrito das areias, ocorre deslizamento para zonas mais profundas. Essas areias vão provocar o prolongamento da praia na horizontal ou em declive a definir pelo utilizador. Quando em cenário de erosão, o que se verifica é a subtração de areias da zona mais alta do perfil. De igual modo, ocorre deslizamento de areias sempre que se verifique a existência de um talude de cálculo com inclinação superior ao ângulo de atrito das areias. A correção da forma do perfil mantém as variações dos volumes, respeitando, assim, a equação da continuidade dos volumes. Os intervalos de tempo a considerar não devem ser muitos grandes para evitar instabilidade nos cálculos (Coelho, 2005). Como apresentado na Figura 14, o LTC é composto por várias sub-rotinas que aumentam a potencialidade dos métodos de cálculo, bem como permite que facilmente se executem alterações.

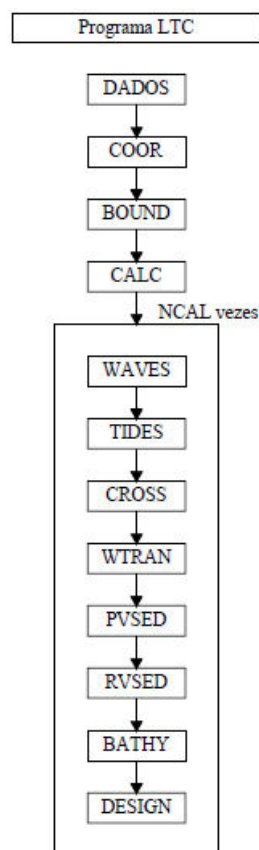


Figura 14 - Organograma da sequência de cálculo do LTC (Coelho, 2005).

O LTC permite determinar as áreas de erosão e acreção ao longo da costa decorrentes da simulação dos diferentes cenários. A área de acreção representa a área em que há o avanço da linha de costa em relação ao cenário de referência. A área de erosão é caracterizada pela área em que se verifica o recuo da linha de costa em relação ao cenário de referência. A soma entre

as duas áreas (acrecção e erosão) define a área perdida após um dado ano de simulação para o respetivo cenário simulado.

Para o estudo pretendido calcularam-se os totais de áreas ainda não perdidas (AANP) (em ha), através da diferença entre as áreas perdidas no cenário de referência (A_0) e em cada um dos cenários ($A_{\#}$), em que $\# = 1, 2, 3, \dots, 8$, como expresso na equação 4:

$$[AANP]_{A\#} = \text{Área Perdida}_{A0} - \text{Área Perdida}_{A\#} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que as áreas perdidas do cenários de referência e de cada cenário simulado respeitam à soma das áreas de acreção e erosão.

3.2 Análise económico-ambiental

Os problemas económico-ambientais apresentam-se, atualmente, como um grande desafio para os decisores políticos. Nas últimas décadas, as ameaças aos sistemas naturais tornaram-se um problema chave na definição de políticas devido às imensas externalidades envolvidas. As limitações inerentes às metodologias económicas convencionais e a necessidade de lidar com diversos conflitos entre política levaram ao desenvolvimento e refinamento de ferramentas de análise para a avaliação estratégica de políticas ou planos ambientais, tanto a nível local como global (Bergh e Nijkamp, 1998).

3.2.1 Estimativa dos custos da alimentação artificial

A análise económica constitui uma avaliação dos custos totais (CT) inerentes a um processo/projeto. Os custos totais são definidos através da soma dos custos fixos e dos custos variáveis. Os custos fixos (CF) representam a parte da despesa que não está dependente do tamanho do projeto, isto é, mesmo que estes sejam nulos, a despesa mantém-se (Nunes, 2011). Os custos variáveis (CV) representam as despesas associadas aos índices de produção e que, portanto, aumentam ou diminuem consoante as necessidades, como é o exemplo do uso de matérias-primas (Nunes, 2011).

Quando aplicado à defesa costeira, identificam-se custos variáveis de investimento e de manutenção. Concretamente, no caso da alimentação artificial, os custos de manutenção não são considerados, pois a manutenção por si representa uma nova intervenção. Em teoria, os custos da alimentação artificial refletem o volume de areia da intervenção. Na prática, distribuem-se pelos estudos prévios e a execução da intervenção. À grande escala, os maiores

custos são referentes à utilização de dragas e tubagem contratadas a um prestador de serviços especializado. A uma escala pequena os custos podem estar associados a sistemas de transposição de areia ou então a transporte de fontes sedimentares para as áreas de alimentação artificial, por via terrestre, em camiões (Linhm e Nicholls, 2010).

Estão identificados diversos fatores que influenciam o custo unitário da alimentação artificial, nomeadamente, a dimensão do projeto (volume de areia a implementar); a distância e número de viagens entre os locais de dragagem de areia e a área de alimentação; a forma do fundo do mar no local da dragagem para a seleção do tipo de draga, o tipo de material a utilizar na alimentação (material grosseiro pode provocar mais danos nos equipamentos e refletir-se nos custos da operação); o grau de exposição do local da alimentação (determinante na seleção dos equipamentos e horas de trabalho); a amplitude das marés, na medida em que podem impedir a proximidade das dragas à área de alimentação atrasando o cumprimento de prazos; e outros requisitos impostos por terceiros (Linhm e Nicholls, 2010).

O valor unitário para os custos de intervenções de alimentação artificial (α_1) foi definido a partir dos resultados da Tabela 3 que resume alguns estudos encontrados na literatura, sendo definido em 6 €/m³.

Tabela 3 - Estudos económicos que avaliam casos de alimentação artificial estabelecendo uma relação custo/volume.

Referência	Tipo de Alimentação Artificial	Volume (Mm ³)	Custo (M€)	Custo/m ³ (€/m ³)
Vale do Lobo (Teixeira <i>et al.</i> , 1998)	Dragagem a 4 km da costa com profundidades entre 16 a 20 m, ao longo de 1400 m	0,60	2,40	4,00
Costa da Caparica e de S. João da Caparica (INAG, 2007)	Informação não disponível	0,50	2,90	5,80
Costa da Caparica e de S. João da Caparica (INAG, 2008)	Informação não disponível	1,00	5,88	5,90
Costa da Caparica e de S. João da Caparica (INAG, 2009)	Informação não disponível	1,00	6,11	6,10
Praia da Falésia (Carpinteiro, 2009)	Informação não disponível	0,70	3,20	4,60
Praia de Albufeira (CMA, 2011)	Dragagem a 4 km da costa e a 20 m de profundidade	0,60	3,00	5,00

Os custos da alimentação artificial ($C(A_{\#})$) são determinados em função dos volumes de areia utilizados nos cenários simulados ($A_{\#}$; 0,5 a 7 Mm³) e resultam do somatório dos custos totais descontados ao longo do tempo do projeto (equação 5):

$$\begin{aligned}
 C(A_{\#}) &= f(A_{\#}) \\
 \Leftrightarrow C(A_{\#}) &= \sum_0^T \frac{C_t}{(1+i)^t} \\
 \Leftrightarrow C(A_{\#}) &= \sum_0^T \frac{\alpha_1 \times A_{\#}}{(1+i)^t} \\
 \Leftrightarrow C(A_{\#}) &= \frac{\alpha_1 \times A_{\#}}{(1+i)^t}
 \end{aligned}
 \tag{eq. 5}$$

Em que, α_1 são os custos unitários definidos para a alimentação artificial (6 €/m³); $A_{\#}$ os volumes da alimentação artificial de cada cenário (0,5 x 10⁶ a 7 x 10⁶ m³); i a taxa de desconto (5%) e t o tempo do projeto. Como os custos da alimentação artificial surgem apenas no início do projeto, os custos são dados pela equação 6:

$$C(A_{\#}) = \alpha_1 \times A_{\#} \tag{eq. 6}$$

3.2.2 Estimativa dos benefícios da proteção costeira

Os benefícios da proteção costeira são determinados pelos bens e serviços costeiros protegidos, nomeadamente pelo valor dos bens e serviços naturais e urbanos. Para este estudo foram definidas duas situações alternativas para as quais foram avaliados os benefícios, uma constituída apenas por área de praias e dunas e uma segunda constituída apenas por área urbana.

Estimativa de benefícios dos bens e serviços ambientais

A transferência de benefícios (TB) é uma ferramenta de adaptação de valores económicos estimados de uma transformação qualitativa ou quantitativa num recurso ambiental para avaliar uma proposta de intervenção num outro recurso semelhante. Nestas situações, o decisor político tipicamente trata os dados a partir do contexto de estudos já existentes (definidos em termos temporais, localização, recursos naturais, mudança da qualidade

ambiental, e/ou efeitos na população afetada) e transferidos para o contexto em que se insere a política que se pretende adotar (Smith *et al.*, 2000, Brouwer, 2000, Boyle e Bergstrom, 1992).

Na literatura distinguem-se diversas abordagens à TB: i) A função de transferência de benefícios (*benefit function transfer*) recorre a uma equação que pretende descrever o modo como a medição de benefícios varia com as características da população ou recursos do local em avaliação. (Downing e Ozuna, 1996, Boyle *et al.*, 2010, Groothuis, 2003); ii) a estimativa de transferência de benefícios (*benefit estimate transfer*) utiliza valores de um local de estudo ou valores médios de vários locais para estimar o valor da área em análise (Downing e Ozuna, 1996, Boyle *et al.*, 2010, Groothuis, 2003); iii) A meta-análise (Bergstrom e Taylor, 2006) parte da compilação de resultados de diferentes estudos, utilizando métodos estatísticos como a estatística Bayesiana (Brundson e Willis, 2002, Bergland, 2006); iv) a calibração de preferência (*preference calibration*) usa estimativas de benefícios já existentes que derivam de metodologias diferentes e combina-as para desenvolver uma estimativa teoricamente consistente para determinar o valor dos locais de estudo (Bergstrom e De Civita, 1999).

Costanza *et al.* (1997) efetuam a caracterização de dezassete serviços de ecossistemas, procurando assim determinar o valor económico total dos ecossistemas a nível mundial. Na Tabela 4 encontram-se definidos os ecossistemas costeiros, por tipo de uso de solo segundo o Corine Land Cover (CLC), tendo por base os estudos de (Costanza *et al.*, 1997, Bossard *et al.*, 2000, Martinez *et al.*, 2007).

Para a realização deste estudo, o valor de praias e dunas, apresentado para o ano de 2000 pela Tabela 4, é de 22.714 € /ha/ano, tendo sido necessário proceder à sua atualização através da deflação do PIB (The World Bank, 2011). O valor que serviu de base para a estimativa dos benefícios unitários das áreas de praias e dunas protegidas (β_1) foi de 29.755,34 €/ha/ano.

Tabela 4 - Valores dos ecossistemas costeiros, por tipo de uso do solo CORINE Land Cover (CLC) (em € de 2000; Fonte: (Alves *et al.*, 2009)).

Tipo de Uso do Solo				Valor €/ha/ano
Nível 1	Nível 2	Nível 3	Código	
Artificiais	Todas	Todas	111-142	0
	Temporárias	Todas	211-213	107
Agrícolas	Pastagens	Pastagens	231	269
	Heterogéneas	Todas	241-244	107
Florestas e áreas naturais	Florestas	Todas	311-313	350
	Arbustivas	Todas	321-324	269
	Descobertas	Praias/dunas	331	22.714
Zonas húmidas	Litorais	Sapais	421	11.588
		Salinas	422	11.588
Planos de água	Costeiros	Lagoas	521	24.265
		Estuários	522	24.265

Os benefícios das áreas de praias e dunas protegidas ($B(A_{\#})$) são determinados em função da área ainda não perdida $[AANP]_{A_{\#}}$ (em ha) e resultam do somatório dos benefícios totais descontados ao longo do tempo do projeto (ver equação 7).

$$\begin{aligned}
 B(A_{\#}) &= f([AANP]_{A_{\#}}) \\
 \Leftrightarrow B(A_{\#}) &= \sum_0^T \frac{B_t}{(1+i)^t} \\
 \Leftrightarrow B(A_{\#}) &= \sum_0^T \frac{\beta_1 \times [AANP]_{A_{\#}}}{(1+i)^t}
 \end{aligned}$$

(eq. 7)

Em que, β_1 é o benefício unitário para áreas de praias e dunas (29.755,34 €/ha/ano); $[AANP]_{A_{\#}}$ representa a área ainda não perdida de cada cenário ao longo do tempo (ha) (ver equação 4); i a taxa de desconto a 5%; e t o tempo de vida do projeto (50 anos).

Estimativa de benefícios dos bens urbanos

A faixa costeira é constituída pela interface terrestre e marítima. Na sua caracterização distinguem-se diferentes usos de solo e ecossistemas. Para o caso de estudo apresentado, de modo a simplificar a estimativa dos benefícios dos bens e serviços urbanos, recorreu-se ao relatório ICI (2010), o qual apresenta um valor médio de avaliação bancária de habitação a nível nacional, em Dezembro de 2010, situado em 1.131 €/m². Fontão (2008) realizou um estudo sobre o valor imobiliário em Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, determinando os custos por m² para a faixa urbana entre a linha de costa e os 100 e 200 metros (Tabela 5), para os quais obteve um valor médio de 1.125 €/m².

Tabela 5 - Custo por m² de áreas edificadas em Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, no ano de 2008 (Fontão, 2008).

Local	Tipo de área	€/m ²
Esmoriz	Urbana – Faixa de 100 metros	1.207,61
	Urbana – Faixa de 200 metros	781,19
Cortegaça	Urbana – Faixa de 100 metros	1.102,43
	Urbana – Faixa de 200 metros	947,06
Furadouro	Urbana – Faixa de 100 metros	1.447,67
	Urbana – Faixa de 200 metros	1.265,98

Assim, o benefício unitário dos bens urbanos protegidos (β_2) é obtido pela determinação da anuidade, em valores atuais, que permite conhecer o valor anual de uma unidade de área urbana, tendo em conta o tempo de vida do projeto. O cálculo da anuidade (β_2) (ver equação 8) é, então, obtido da seguinte forma (Brealey *et al.*, 2001):

$$\beta_2 = P \times \left[\frac{i}{(1 - (1 + i)^{-t})} \right] \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que P é o valor da unidade imobiliária; t , o tempo do projeto; e i é a taxa de desconto (5%). O valor de anuidade, β_2 , obtido foi de 619.524,88 €/ha/ano, constituindo assim o resultado unitário para os benefícios de áreas urbanas a considerar nos cálculos económico-ambientais do capítulo 5.

Então, os benefícios das áreas urbanas protegidas ($B(A_{\#})$) são determinados em função da área ainda não perdida e calculam-se a partir do somatório dos benefícios totais descontados ao longo do tempo do projeto (ver equação 9).

$$\begin{aligned}
 B(A_{\#}) &= f([AANP]_{A_{\#}}) \\
 \Leftrightarrow B(A_{\#}) &= \sum_0^T \frac{B_t}{(1 + i)^t} \\
 \Leftrightarrow B(A_{\#}) &= \sum_0^T \frac{\beta_2 \times [AANP]_{A_{\#}}}{(1 + i)^t}
 \end{aligned} \quad (\text{eq. 9})$$

Em que, β_2 é o benefício unitário calculado para áreas urbanas (619.524,88 €/ha/ano); $[AANP]_{A_{\#}}$ representa a área ainda não perdida de cada cenário ao longo do tempo (ha) (ver equação 4); i a taxa de desconto a 5%; e t o tempo de vida do projeto (50 anos).

3.2.3 Análise custo-benefício

A análise custo-benefício (ACB) é uma ferramenta utilizada para comparar diferentes tomadas de decisão tendo por referência os benefícios sociais líquidos produzidos para a sociedade em geral. A expressão “benefícios sociais líquidos” refere-se à diferença entre os benefícios e os custos sociais. Os benefícios e os custos são “sociais”, uma vez que são medidos para quem usufrui dos mesmos, não estando limitados a transações de mercado. Tratam-se de valores que são identificados numa base compreensiva, uma vez que em muitos casos podem não existir preços de mercado. Então, a análise de custo-benefício parte de estimativas que pretendem refletir valores económicos reais (DFA, 2006).

A utilização da ACB está associada à deliberação de decisões que comprometem recursos, nomeadamente, decisões sobre a introdução ou reforma de políticas governamentais ou decisões sobre o investimento em determinados projetos (Hanley e Barbier, 2009). A definição de etapas na elaboração duma ACB não é estática e será variável com a tipologia do projeto, *e.g.*, projetos de curto prazo não necessitarão do desconto de benefícios/custos futuros; projetos que tenham sido implementados diversas vezes terão riscos/incertezas mais previsíveis. De um modo geral, e em conformidade com o que a abordagem que se desenvolve neste estudo, a avaliação de um projeto poderá ter em conta os seguintes passos (Zerbe e Bellas, 2006):

1. Identificação clara do problema inicial;
2. Identificação de alternativas;
3. Definição de hipóteses;
4. Listagem de impactos de cada alternativa;
5. Atribuição de valores aos impactos provocados;
6. Gestão dos impactos não quantificados;
7. Desconto de valores futuros para obtenção de valores atuais;
8. Identificação e contabilização de incertezas;
9. Comparação de custos e benefícios;
10. Realização de uma análise após a execução do projeto;

Assim, a análise da viabilidade de projetos requer a utilização de parâmetros económicos como o Valor Atual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Ponto de Equilíbrio (PE).

O VAL (equação 10) é um dos métodos usados para determinar se um projeto é interessante do ponto de vista financeiro. Permite que os valores das entradas e saídas do projeto sejam comparados, sendo definido como a diferença entre o somatório dos benefícios descontados (equações 7 e 9) e o somatório dos custos descontados (equação 6) do projeto (Zerbe e Bellas, 2006).

$$VAL = \sum_0^T \frac{B_t}{(1+i)^t} - \sum_0^T \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (\text{eq. 10})$$

Em que, B_t são os benefícios não descontados; C_t os custos não descontados; i é a taxa de desconto e t o tempo de vida do projeto. Se o valor dos benefícios descontados (saídas) for superior ao valor dos custos descontados (entradas), então o VAL será positivo e, do ponto de vista da análise, o projeto deverá ser concretizado. Por outro lado, um VAL negativo desaconselha a realização do projeto (Zerbe e Bellas, 2006).

A TIR (equação 11) é a taxa de interesse para a qual o VAL é zero, ou seja, a taxa para a qual o somatório dos benefícios descontados (equações 7 e 9) igualam o somatório dos custos descontados do projeto (equação 6).

$$\sum_0^T \frac{B_t}{(1+i_{TIR})^t} = \sum_0^T \frac{C_t}{(1+i_{TIR})^t} \quad (\text{eq. 11})$$

Em que, i_{TIR} corresponde à TIR. Neste caso, o investimento num projeto é considerado exequível caso $i_{TIR} > i$ (Zerbe e Bellas, 2006).

O PE é o tempo necessário para que seja recuperado o investimento realizado no projeto. Representa o período de tempo, T , para o qual o somatório dos custos e benefícios descontados é igual a zero (Brealey *et al.*, 2001).

$$\sum_0^T B(A_{\#}) = C(A_{\#}) \quad (\text{eq. 12})$$

A aplicação do desconto de custos e benefícios ao longo do tempo do projeto tem por base o facto de o dinheiro hoje valer mais do que valerá no próximo ano. A taxa de desconto, i , é a taxa que permite fazer a conversão de valores futuros em valores atuais (Brealey *et al.*, 2001).

Neste estudo foi escolhida uma taxa de 5% por se considerar um valor adequado para o horizonte de 50. Uma breve análise ao comportamento da taxa de desconto mostra que como se pode verificar pela Figura 15, a tendência é para que o valor monetário (sendo taxas de desconto reduzidas ou mais elevadas) seja muito pequeno para tempos muito longos, contribuindo como argumento para não prolongar o tempo do estudo além dos 50 anos.

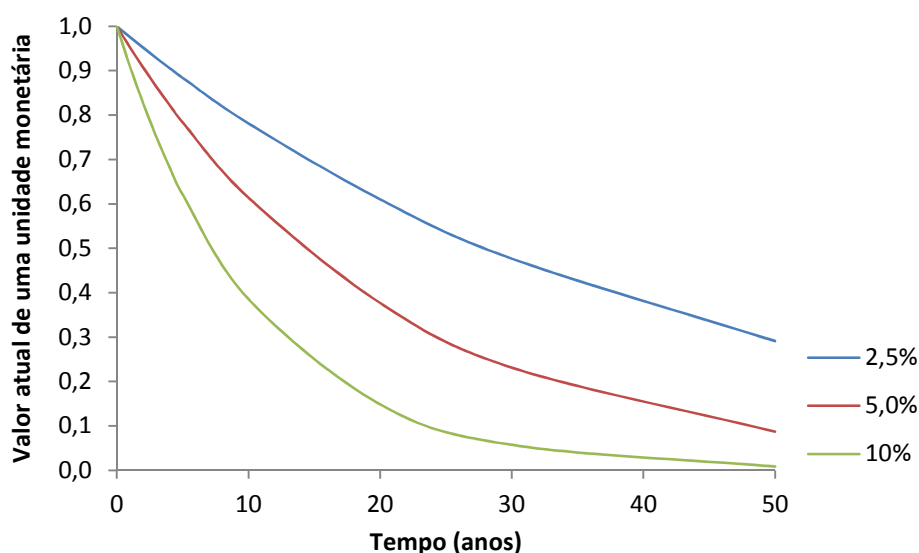


Figura 15 - Valor atual de uma unidade monetária em função de várias taxas de desconto, ao longo do tempo (anos). Adaptado de Brealey *et al.* (2001).

- **Análise de sensibilidade**

Para avaliar os efeitos potenciais variações aos resultados obtidos, procedeu-se a uma análise de sensibilidade. Assim, por um lado, para os custos ($C(A_{\#})$) fez-se variar o preço unitário da alimentação artificial (α_1) para valores inferiores em 25% e 50%. Por outro lado, na análise de sensibilidade efetuada aos benefícios ($B(A_{\#})$), fez-se variar os benefícios de áreas de praias e dunas (β_1) e de áreas urbanas (β_2) em $\pm 25\%$. Brealey *et al.* (2001), referem que uma variação de 25% (positiva e negativa) é suficiente para ter uma boa representação da sensibilidade dos resultados, no entanto, como os custos unitários de alimentação artificial considerados neste estudo são elevados, optou-se por fazer a análise reduzindo ainda mais o seu valor já que não haveria interesse em que os valores fossem mais altos.

Para facilitar a representação e interpretação desta análise tem-se: $\alpha_1=C$; β_1 e $\beta_2=B$. Foi definido então o seguinte conjunto de notações:

- **CB** – Custos e Benefícios de valor base;
- **CB_[+25]** – Custos de valor base e Benefícios superiores em 25%;
- **CB_[-25]** – Custos de valor base e Benefícios inferiores em 25%;
- **C_[-25]B** – Custos inferiores em 25% e Benefícios de valor base;
- **C_[-25]B_[+25]** – Custos inferiores em 25% e Benefícios superiores em 25%;
- **C_[-25]B_[-25]** – Custos inferiores em 25% e Benefícios inferiores em 25%;
- **C_[-50]B** – Custos inferiores em 50% e Benefícios de valor base;
- **C_[-50]B_[+25]** – Custos inferiores em 50% e Benefícios superiores em 25%;
- **C_[-50]B_[-25]** – Custos inferiores em 50% e Benefícios inferiores em 25%;

Relembrando que, $C(\alpha_1)$ define-se pelo valor de 6€/m³; $B(\beta_1)$ para os bens e serviços de praias e dunas tem o valor de 29.755,34 €/ha/ano; $B(\beta_2)$ para áreas urbanas tem o valor de 619.524,88 €/ha/ano.

3.2.4 Otimização dinâmica

Fankhauser (1994) apresenta a questão da otimização de soluções aplicada à mitigação dos efeitos da subida do nível do mar. De forma simplista, a solução ótima seria o ponto em que os custos marginais e os benefícios marginais da mitigação se igualam. Assim, obtém-se o volume ótimo de alimentação artificial quando a primeira derivada do lucro (π), em ordem ao volume de alimentação ($A_{\#}$), é igual a zero (equação 15). Graficamente, identifica-se como sendo o ponto mais distante entre a curva dos benefícios das áreas protegidas ($B(A_{\#})$) (equação 12) e a curva relativa aos custos da alimentação artificial de praias ($C(A_{\#})$) (equação 6).

Com base na simulação dos cenários de alimentação artificial (0,5 a 7,0 Mm³), estimaram-se as curvas de benefícios para áreas de praias e dunas e áreas urbanas da alimentação artificial $B(A_{\#})$ de acordo, com a seguinte equação potencial (equação 13):

$$B(A_{\#}) = \gamma_1 \times A_{\#}^{\gamma_2} \quad (\text{eq. 13})$$

Onde, γ_1 e γ_2 , são os parâmetros estimados da equação; e $A_{\#}$ representa os volumes de alimentação artificial de areia de cada cenário (em Mm³). Os custos da alimentação artificial ($C(A_{\#})$), como apresentado no capítulo 3.2.1, são dados pela equação 6 (ver cap. 3.2.1):

$$C(A_{\#}) = \alpha_1 \times A_{\#}$$

O lucro (π) é dado pela diferença entre os benefícios (equação 12) e os custos (equação 6):

$$\begin{aligned}\pi &= B(A_{\#}) - C(A_{\#}) \\ \Leftrightarrow \pi &= \gamma_1 \times A_{\#}^{\gamma_2} - \alpha_1 \times A_{\#}\end{aligned}$$

(eq. 14)

Então, resolvendo a primeira derivada do lucro ($\partial\pi$), em ordem ao volume (∂A) e igualando a zero, obtém-se, o volume ótimo de alimentação artificial - A_0^* (em Mm^3) (equação 14).

$$\begin{aligned}\frac{\partial\pi}{\partial A} &= 0 \\ \Leftrightarrow (\gamma_1 \times \gamma_2) \times A^{(\gamma_2-1)} - \alpha_1 &= 0 \\ \Leftrightarrow A^{(\gamma_2-1)} &= \left(\frac{\alpha_1}{\gamma_1 \times \gamma_2} \right) \\ \Leftrightarrow A_0^* &= \left(\frac{\alpha_1}{\gamma_1 \times \gamma_2} \right)^{\frac{1}{(\gamma_2-1)}}\end{aligned}$$

(eq. 15)

Esta equação permitirá definir qual o volume de alimentação artificial de areia que maximiza os benefícios dos investimentos dos oito cenários de simulação propostos.

Capítulo 4 – Caso de estudo

4.1 Condições iniciais para a zona costeira da região Centro de Portugal

O caso de estudo selecionado pretende representar um cenário generalista, no entanto, são atribuídos parâmetros físicos baseados em dados reais para que os resultados tenham validade e possam ser discutidos. Assim, atendendo ao conhecimento existente sobre a costa portuguesa através de diversos estudos já realizados, optou-se por adaptar o caso de estudo a condições naturais típicas para o litoral da região Centro de Portugal.

Para uma correta configuração do LTC foi necessário definir cinco elementos principais: condições fronteira, dados de altimetria, dados gerais, agitação marítima e regime de marés. Tratando-se de um caso de estudo genérico adotou-se uma posição de linha de costa com orientação Norte-Sul, perfeitamente linear nessa área de modelação, com 5 km de largura e uma extensão de 20 km, caracterizados por uma malha de 251 pontos na direção transversal espaçados por 20 metros e 401 pontos na direção longitudinal espaçados por 50 metros. O perfil transversal da praia é caracterizado por um declive de praia de 1,5% na zona emersa e por uma forma exponencial na zona submersa (ver perfil transversal na Figura 16). A área de estudo foi analisada em cinco perfis igualmente distanciados (5 km) que permitiram também a avaliação dos quatro trechos compreendidos entre cada dois perfis (Figura 17).

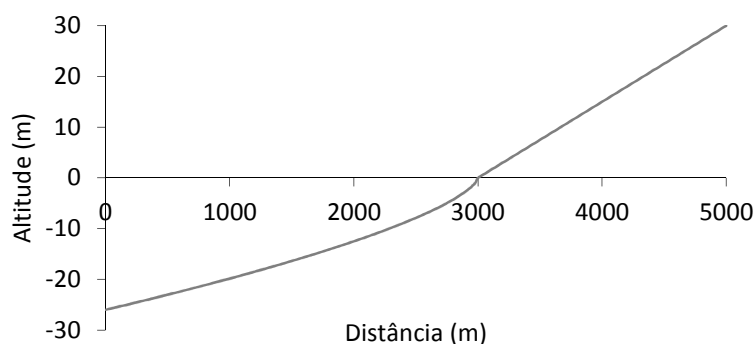


Figura 16 - Perfil transversal da configuração do cenário de referência, no ano 0.

Através das condições fronteira do modelo definiu-se que não há transporte sedimentar vindo de Norte ($Q_s=0$ m/s) representando um déficit sedimentar que resulta em erosão na área modelada. No entanto, uma vez que há transporte sedimentar ao longo de toda a área modelada, os sedimentos saem do modelo na fronteira Sul.

Os dados gerais caracterizam valores típicos de variáveis do sistema costeiro (Coelho, 2005), nomeadamente, a viscosidade da água e os sedimentos (diâmetro de 0,3 mm). A fórmula CERC permite avaliar o potencial de transporte de sedimentos e, utilizando um coeficiente de proporcionalidade (k) de 0,39, resultou um caudal anual de sedimentos de $1,5 \text{ Mm}^3/\text{ano}$. Foi estabelecido um regime de onda e batimetria regulares, sem variação das marés astronómicas e meteorológicas, nem do nível do mar. O clima de agitação foi definido com altura de onda de 1,5 metros e com rumo de 80° com o Norte cartográfico (WNW) (Coelho, 2005).

4.2 Cenários de alimentação artificial

Para se proceder à modelação de cada alimentação artificial de areia definiu-se que a área de intervenção representaria uma extensão de 300 metros na direção transversal por 1000 metros na direção longitudinal, implementados a partir duma profundidade de 2 metros e prolongando-se em direção à costa, com uma capacidade máxima de alimentação de 1 milhão de metros cúbicos por mês. Todos os ensaios foram feitos com a alimentação a ser colocada aos 10 Km de distância da fronteira Norte (correspondente ao perfil 3), distribuindo-se uniformemente entre os trechos 2-3 e 3-4 (ver Figura 17).

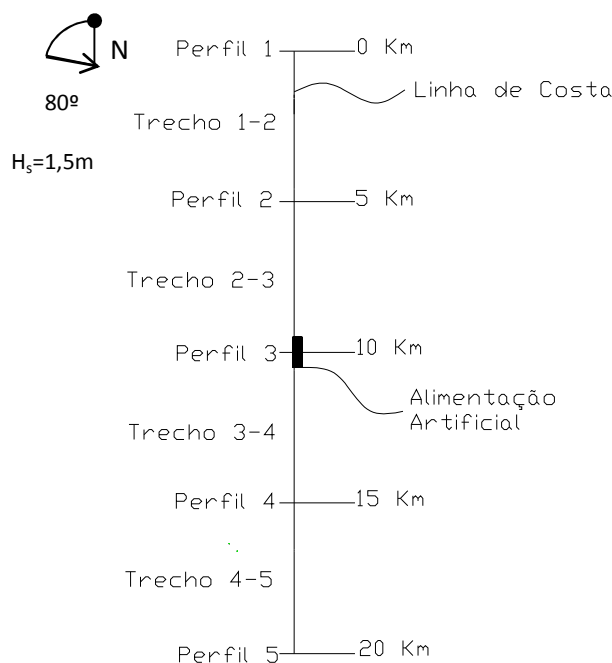


Figura 17 - Configuração da linha de costa a modelar nas condições iniciais de simulação.

A simulação de diferentes cenários de alimentação artificial (incluindo o cenário de não realização de alimentações) tem por objetivo, por um lado, perceber o comportamento da linha de costa quando não se efetua qualquer operação e, por outro lado, verificar os impactos de implementar diferentes volumes de areia. Deste modo, estima-se que seja possível concluir sobre a quantidade ótima de areia a colocar.

O cerne do problema que motiva este estudo é a erosão do litoral, pelo que se avaliou a dimensão da erosão numa simulação a longo prazo, procurando atingir uma posição de equilíbrio. Para tal, sem recorrer a qualquer intervenção de alimentação artificial foram realizadas diversas simulações que permitiram observar que, ao fim de 300 anos de simulação já se atinge uma tendência para o equilíbrio, como pretendido (Figura 18).

Os ensaios efetuados mostraram que a escala temporal de 50 anos é adequada, por se tratar do período em que a erosão evolui mais rapidamente. A Figura 18 permite verificar que a área perdida após 50 anos é de 1.300 ha e após 300 anos é de cerca de 2.900 ha, representando então cerca de 46% do total de erosão. Apenas por volta dos 200 anos são atingidos os 90% de erosão (150 anos depois), sendo que nos últimos 100 anos só ocorreu um aumento de 10% da erosão total.

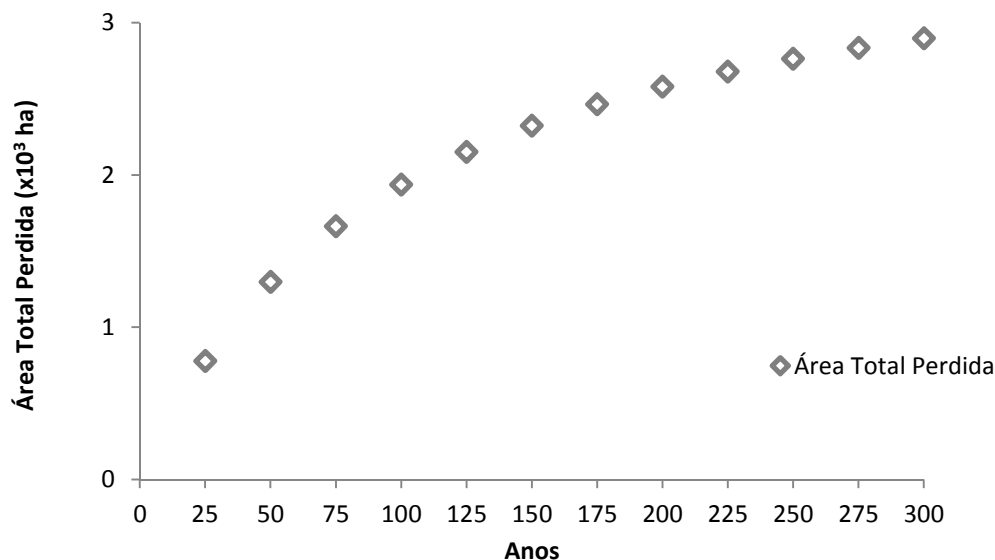


Figura 18 - Área perdida no cenário de referência ao longo de 300 anos ($\times 10^3$ ha).

Foram definidos 8 cenários de simulação (cenário 1 a 8), com volumes de alimentação artificial de areia que variam entre $0,5 \text{ Mm}^3$ e 7 Mm^3 (ver Tabela 6). Estes valores procuram abranger uma gama de volumes de areia comuns neste tipo de intervenções ($0,5$ a 2 Mm^3), mas também volumes que permitam verificar se ocorrem melhorias significativas com aumentos

consideráveis (3 a 7 Mm³). Atendendo à capacidade máxima de alimentação artificial de 1 Mm³/mês, os períodos das intervenções variam entre os 15 dias e os 7 meses, tratando-se de prazos bastante longos que têm implicações não só nos custos como também na proteção costeira, já que a areia vai-se distribuindo com o tempo, diminuindo a eficácia da intervenção.

Tabela 6 - Caracterização dos cenários simulados, representando diferentes volumes de alimentação (Mm³).

Cenário	Volume (Mm ³)
Cenário 1	0,5
Cenário 2	1,0
Cenário 3	2,0
Cenário 4	3,0
Cenário 5	4,0
Cenário 6	5,0
Cenário 7	6,0
Cenário 8	7,0

Capítulo 5 – Resultados

5.1 Análise física do cenário de referência

A simulação do cenário de referência foi realizada com controlo de resultados a cada 5 anos, para os quais foi efetuada uma análise da evolução das áreas de erosão representadas pelo modelo. De modo a perceber o interface gráfico devolvido pela simulação e posteriormente manipulado para o cálculo das áreas através do *software* Autocad 2011, a Figura 19 ilustra o cenário de referência ao longo dos 50 anos. Todos cenários simulados podem ser observados no Anexo 1.

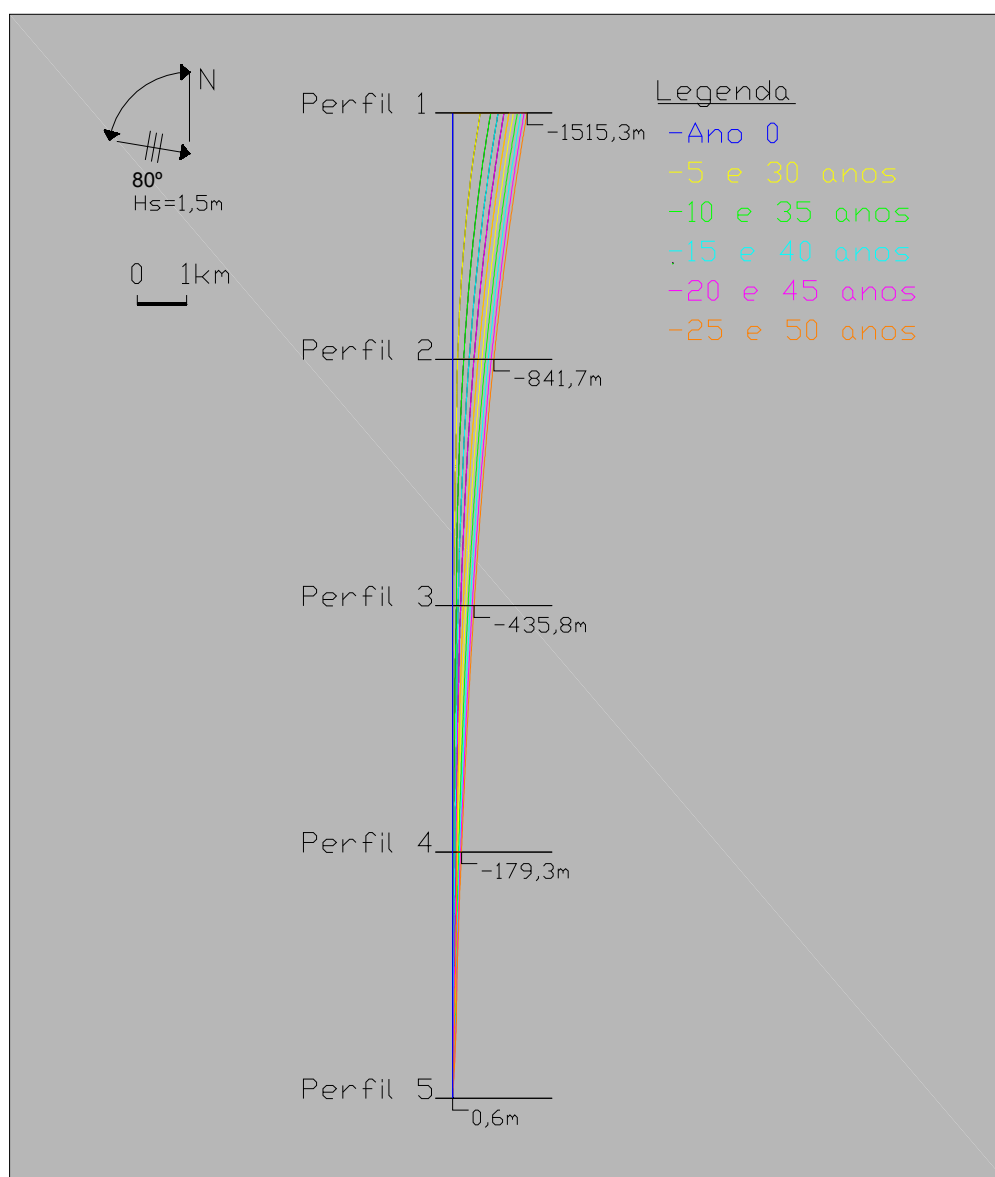


Figura 19 - Simulações do cenário de referência, a 50 anos.

Os resultados obtidos para os totais de área perdida (AP) no cenário de referência mostram a tendência para o aumento da área de erosão (AE), não havendo área de acreção (AAc). No entanto, pode-se verificar na Tabela 7 que a área marginal perdida entre cada ano de controlo vai sendo menor com o passar do tempo, indicando um abrandamento da erosão. Entre os 5 e 10 anos ocorre um aumento de 87% de área erodida, mas entre os 45 e 50 anos, apenas ocorre um aumento de 7%, com tendência a diminuir caso a simulação se prolongasse por mais tempo.

Tabela 7 - Total de área perdida no cenário de referência, para 50 anos (ha).

Tempo (Anos)		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Cenário de Referência	AE	0	167	312	443	561	667	764	852	934	1.010	1.081
	AAc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	AP	0	167	312	443	561	667	764	852	934	1.010	1.081
Tempo (anos)		[5-10]	[10-15]	[15-20]	[20-25]	[25-30]	[30-35]	[35-40]	[40-45]	[45-50]		
Área Perdida Marginal		+87%	+42%	+27%	+19%	+14%	+12%	+10%	+8%	+7%		

Nota: AE – área de erosão; AAc – área de acreção; AP – áreas perdidas.

A caracterização do cenário de referência por trechos permite verificar os locais em que o impacto da erosão é superior. Quanto mais a Norte se localiza o trecho, maior é a área perdida, este valor é gradualmente menor nos trechos 2-3 e 3-4 e atingem-se valores mínimos no trecho 4-5 localizado a Sul (ver Tabela 8).

Tabela 8 - Área perdida por secção de estudo, no cenário de referência (em ha).

Tempo (anos)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Trecho 1-2	0	137	226	294	350	398	440	478	512	544	573
Trecho 2-3	0	27	63	101	139	174	206	235	263	287	311
Trecho 3-4	0	3	20	38	53	69	87	104	120	136	150
Trecho 4-5	0	0	3	10	19	26	31	35	39	43	47
Total	0	167	312	443	561	667	764	852	934	1.010	1.081

5.1.2 Discussão

Os resultados da Tabela 7 contribuem para a decisão de realizar as simulações numa escala temporal de 50 anos, uma vez que se verifica que nos últimos 5 anos apenas ocorre um aumento de área erodida de 7%. A não ocorrência de entrada de sedimentos a Norte leva a que o transporte sedimentar induzido pelas ondas vá provocar erosão e, uma vez que não há

reposição dos sedimentos, leva a que o trecho Norte seja o que perde maior área. Analisando a evolução da linha de costa, por não haver um fluxo contínuo de realimentação, esta vai-se aproximando da direção das cristas da onda incidente. A Sul, como foi assumido que o volume de saída de sedimentos é extrapolado do valor médio da zona adjacente à fronteira Sul, os sedimentos que chegam são os mesmos que afluem à fronteira, e verifica-se que os fenómenos de erosão e/ou acreção são residuais.

Numa análise ao modelo LTC (ver Figura 20), Coelho (2005) verificou o comportamento da linha de costa em diferentes condições de simulação, nomeadamente com fronteiras abertas e fechadas a Norte e Sul. Assim, a ausência do transporte de sedimentos a Norte provoca o efeito de erosão registado neste caso de estudo, por outro lado, na situação em que as fronteiras são abertas, o volume sedimentar é que vai determinar a forma da linha de costa podendo mesmo ser inverso à direção da crista das ondas.

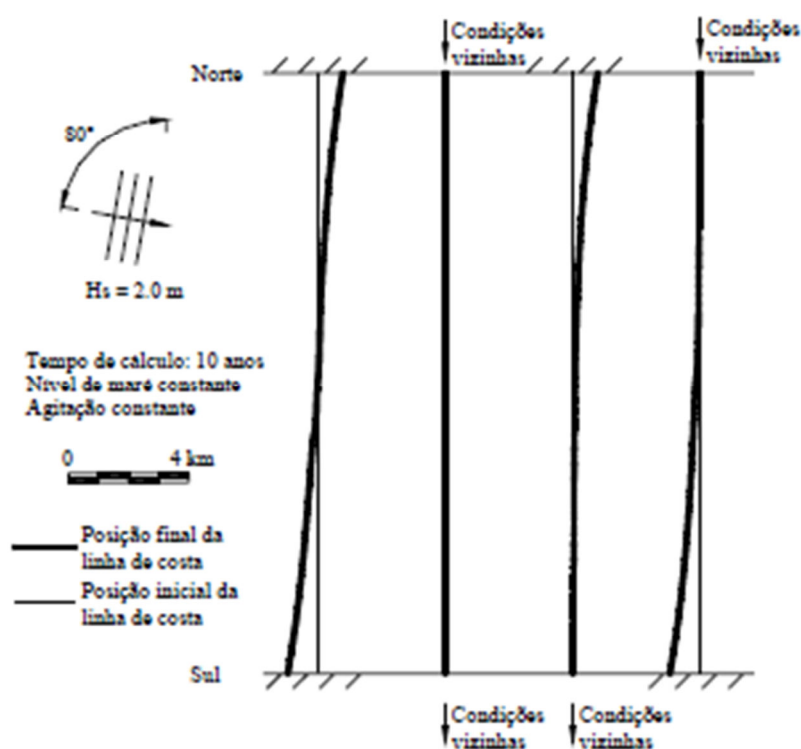


Figura 20 - Configuração em planta da linha de costa, em função das condições de alimentação sedimentar nas fronteiras (extrapolação das condições de transporte sedimentar vizinhas às fronteiras) (Coelho, 2005).

Principais conclusões

*** O horizonte de 50 anos de simulação é indicado, uma vez que nos últimos anos a erosão apenas aumentou 7%, contrariamente ao período inicial em que a erosão aumentou 87%.**

*** A ausência de fluxo de entrada de sedimentos no trecho Norte condiciona a forma da linha de costa, provocando mais erosão no trecho Norte (1-2) com tendência a diminuir nos restantes trechos (2-3 e 3-4), sendo praticamente inexistente no trecho que faz fronteira a Sul (4-5).**

5.2 Análise física dos diferentes cenários

A análise realizada para avaliar cada cenário de alimentação artificial considerou a determinação das áreas de erosão e das áreas de acreção. Estas áreas resultam da diferença entre a posição da linha de costa no ano zero e a posição da linha de costa em cada ano de controlo. Um avanço da linha de costa representa área de acreção e o recuo da linha de costa representa área de erosão.

A simulação dos 8 cenários definidos, de acordo com os volumes expressos na Tabela 6, evidenciou que em todos os cenários a área perdida é inferior à área perdida no cenário de referência (ver Tabela 9). Após 5 anos, é possível verificar a existência de áreas de acreção em todos os cenários, sendo esta maior quanto maior é o volume de areia utilizado na alimentação. Após 10 anos ainda é possível visualizar algumas áreas de acreção entre o cenário 3 e o cenário 8. Para todos os cenários se verifica uma diminuição de área perdida por intervalo de tempo, ao longo dos 50 anos, evidenciando um comportamento regular na evolução da posição da linha de costa. As áreas de erosão vão aumentando ao longo do tempo e são menores quando se consideram volumes de alimentação artificial maiores. Após 5 anos a diferença entre a área perdida no cenário 1 (158 ha) e a área perdida no cenário 8 (143 ha) é de 10%. Esta diferença, após 50 anos, é de apenas 2% ainda que em termos absolutos represente mais área do que os 10% anteriores (27 ha e 15 ha, respetivamente).

Tabela 9 - Total de área perdida nos cenários 1 a 8, ao longo de 50 anos (ha).

Anos		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Cenário 1	AE	0	161	303	436	556	663	760	849	932	1.008	1.079
	AAc	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	AP	0	158	303	436	556	663	760	849	932	1.008	1.079
Cenário 2	AE	0	161	300	433	552	659	757	847	929	1.006	1.077
	AAc	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	AP	0	156	300	433	552	659	757	847	929	1.006	1.077
Cenário 3	AE	0	160	297	429	548	655	752	842	924	1.001	1.073
	AAc	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	AP	0	153	297	429	548	655	752	842	924	1.001	1.073
Cenário 4	AE	0	158	293	425	543	650	747	836	919	996	1.068
	AAc	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	AP	0	151	293	425	543	650	747	836	919	996	1.068
Cenário 5	AE	0	157	290	422	540	646	743	832	915	992	1.063
	AAc	0	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	AP	0	149	290	422	540	646	743	832	915	992	1.063
Cenário 6	AE	0	156	288	419	536	643	740	829	911	988	1.060
	AAc	0	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	AP	0	147	287	419	536	643	740	829	911	988	1.060
Cenário 7	AE	0	155	285	416	533	639	736	825	907	984	1.056
	AAc	0	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	AP	0	145	284	416	533	639	736	825	907	984	1.056
Cenário 8	AE	0	154	283	413	530	636	733	822	904	981	1.052
	AAc	0	11	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	AP	0	143	281	413	530	636	733	822	904	981	1.052

Nota: notação desenvolvida na Tabela 7.

De seguida foram calculados os totais de áreas ainda não perdidas (AANP) (equação 4, cap. 3.2.1). Os resultados mostram que o período em que se verificam valores mais elevados de área ainda não perdida ocorrem após 10 anos e posteriormente a área não perdida diminui (ver Tabela 10). No entanto, para os cenários 5 a 8, verifica-se que a área ainda não perdida se mantém nos mesmos valores até aos 30-40 anos. No cenário 8 atinge-se mesmo um novo máximo de área não perdida aos 30 anos. Para os cenários 1 a 4, a área não perdida após 50 anos é pouco relevante, sendo inferior à área que se verificava após 5 anos de simulação. Nos cenários 5 a 8, a área ainda não perdida no ano 50 é semelhante ou até mesmo superior à área que se verificava após 5 anos.

Tabela 10 - Total de área ainda não perdida, para os diferentes cenários (em ha).

Anos	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Cenário 1	0,0	8,4	9,0	6,6	5,0	4,0	3,4	3,0	2,6	2,4	2,3
Cenário 2	0,0	10,9	11,7	9,8	8,6	7,7	6,6	5,7	5,0	4,5	4,1
Cenário 3	0,0	13,4	15,4	13,9	13,0	12,5	11,7	10,9	10,0	9,1	8,2
Cenário 4	0,0	15,5	19,1	17,8	17,4	17,2	16,7	16,0	15,2	14,4	13,6
Cenário 5	0,0	17,8	22,4	21,1	21,0	21,0	20,7	20,1	19,4	18,6	17,8
Cenário 6	0,0	19,9	25,4	24,2	24,2	24,5	24,3	23,8	23,1	22,4	21,6
Cenário 7	0,0	21,8	28,2	27,2	27,4	28,0	27,9	27,6	27,0	26,3	25,4
Cenário 8	0,0	23,3	30,7	29,8	30,2	30,9	30,9	30,7	30,1	29,4	28,7

Também se procedeu à análise da variação das áreas ainda não perdidas em cada trecho, no sentido de compreender a distribuição espacial dos sedimentos ao longo do tempo (ver Figura 21). Assim, verifica-se que as maiores áreas não perdidas se encontram nos trechos 2-3 e 3-4, respetivamente, a Norte e a Sul dos locais onde são realizadas as alimentações artificiais.

Observando a distribuição temporal e espacial das áreas não perdidas (Figura 21), regista-se que após 5 anos, os valores maiores de área não perdida verificam-se no trecho 2-3 e após 10 anos, o máximo de área não perdida ocorre no trecho 3-4. No trecho 1-2 observa-se o aumento de área não perdida ao longo dos anos, havendo a tendência para a estabilização da área a partir dos 30 anos.

De um modo geral e fazendo uma avaliando ao longo do tempo, o trecho 2-3 apresenta melhores resultados em área não perdida, posteriormente segue-se o trecho 3-4, o trecho 1-2 e o trecho 4-5 é aquele que apresenta menos área ainda não perdida, ainda que seja também a localização em que ocorre menos erosão. Após 50 anos, com exceção do trecho 4-5, verifica-se que os 3 trechos mais a Norte apresentam valores de área não perdida muito semelhantes entre si.

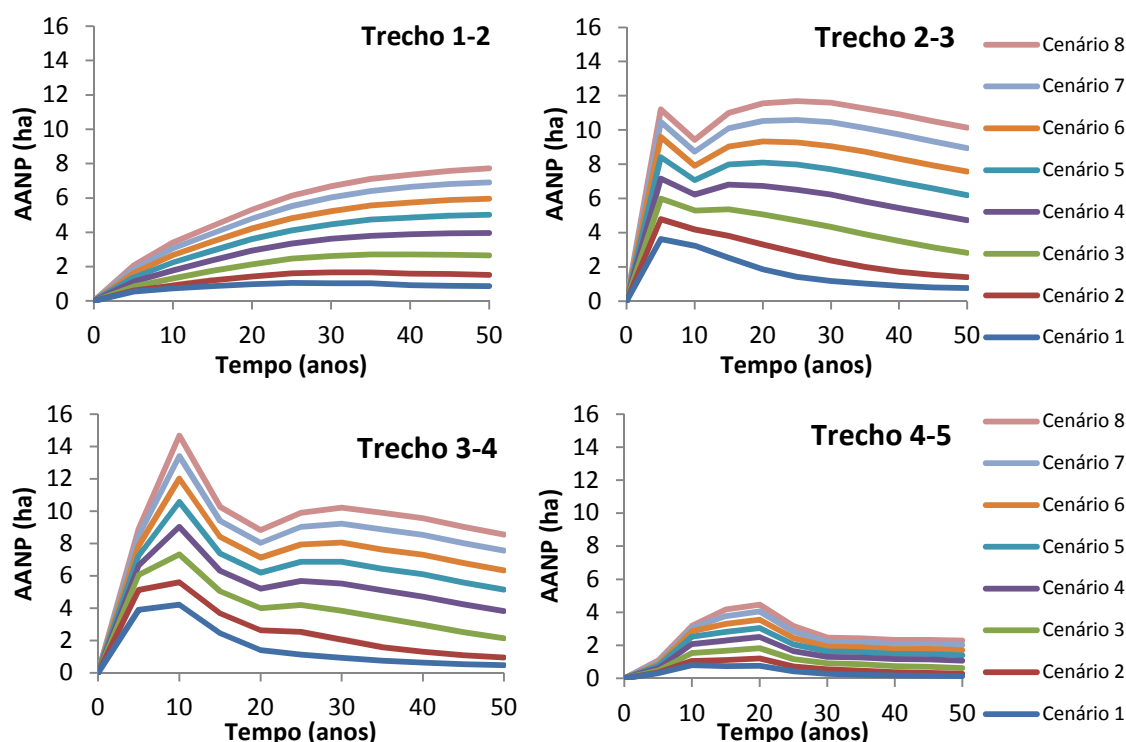


Figura 21 - Evolução das áreas que constituem os 8 cenários (0,5 Mm³ a 7 Mm³) modelados ao longo de 50 anos (m²).

5.2.2 Discussão

Numa análise quantitativa aos valores da Tabela 10 regista-se que o volume de alimentação não corresponde proporcionalmente à área ganha, ou seja, colocar duas vezes mais areia, não garante uma área ganha duas vezes superior. Por coincidência, esta relação quase que se verifica quando se avaliam os resultados após 50 anos. No entanto, como os volumes de alimentação não são colocados instantaneamente, estando limitados nestas condições de simulação a uma capacidade máxima de alimentação de 1 Mm³/mês, a areia vai sendo distribuída ao longo do tempo da operação, diminuindo o seu impacto na área em que é feita a alimentação. Também na Tabela 10, do cenário 5 ao cenário 8 surgem dois valores máximos de área ainda não perdida, um primeiro aos 10 anos e um segundo aos 25 ou 30 anos, contrariamente aos restantes cenários (1 a 4) em que apenas se verifica um máximo. Este facto pode ser explicado pelo efeito de transporte de areia que se encontra abaixo do nível do mar, levando a que os elevados volumes de areia transferidos requeiram um tempo maior para serem distribuídos. Como se pressupõe que a areia a alimentar é idêntica à que já existe

no local, Dean (2002), definiu que os seus movimentos podem ser caracterizados de forma simplificada de acordo a Figura 22.

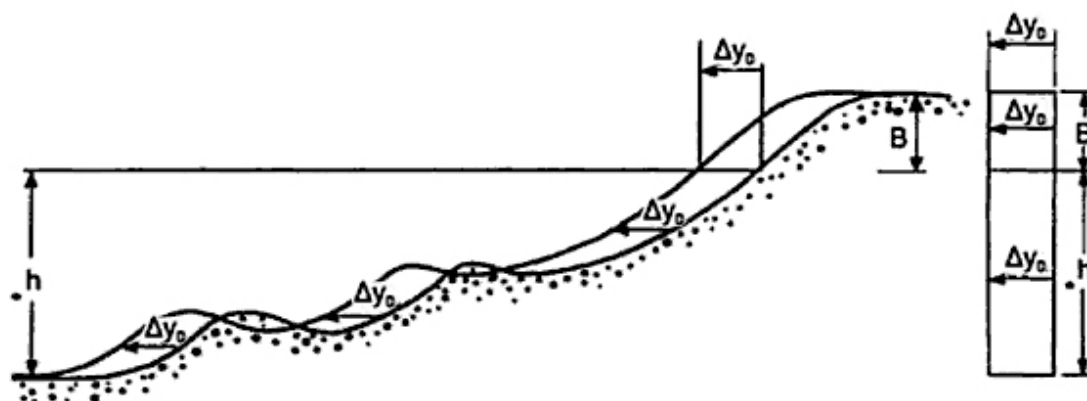


Figura 22 - Translação de perfil associada à densidade do volume adicionado, usando areia compatível. Adaptado de (Dean, 2002).

Dean (2002) mostrou que a direção das ondas é afetada pela refração em torno da forma da alimentação, alterando o alinhamento do rebentamento das ondas com a linha de costa e reduzindo o efeito de transporte de sedimentos da zona de alimentação. Este efeito repete-se com a mudança da direção da crista das ondas (Figura 23).

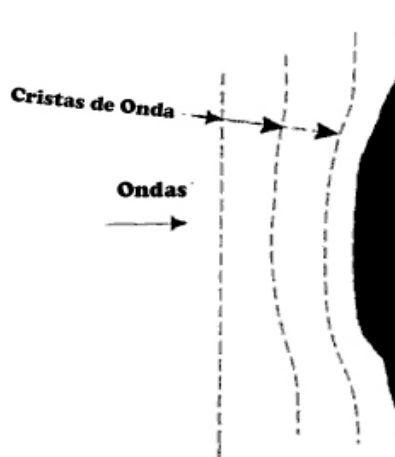


Figura 23 - Esquema representativo da refração na crista das ondas numa área de alimentação artificial. Adaptado de (Dean, 2002).

Este fenómeno de refração de ondas promove o efeito de evolução verificado nas simulações realizadas, e justifica a distribuição espacial da alimentação ao longo do tempo pelas diferentes secções de estudo. A Figura 24 ilustra o desenvolvimento de uma área de alimentação artificial, com ondulação perpendicular ao perfil da linha de costa.

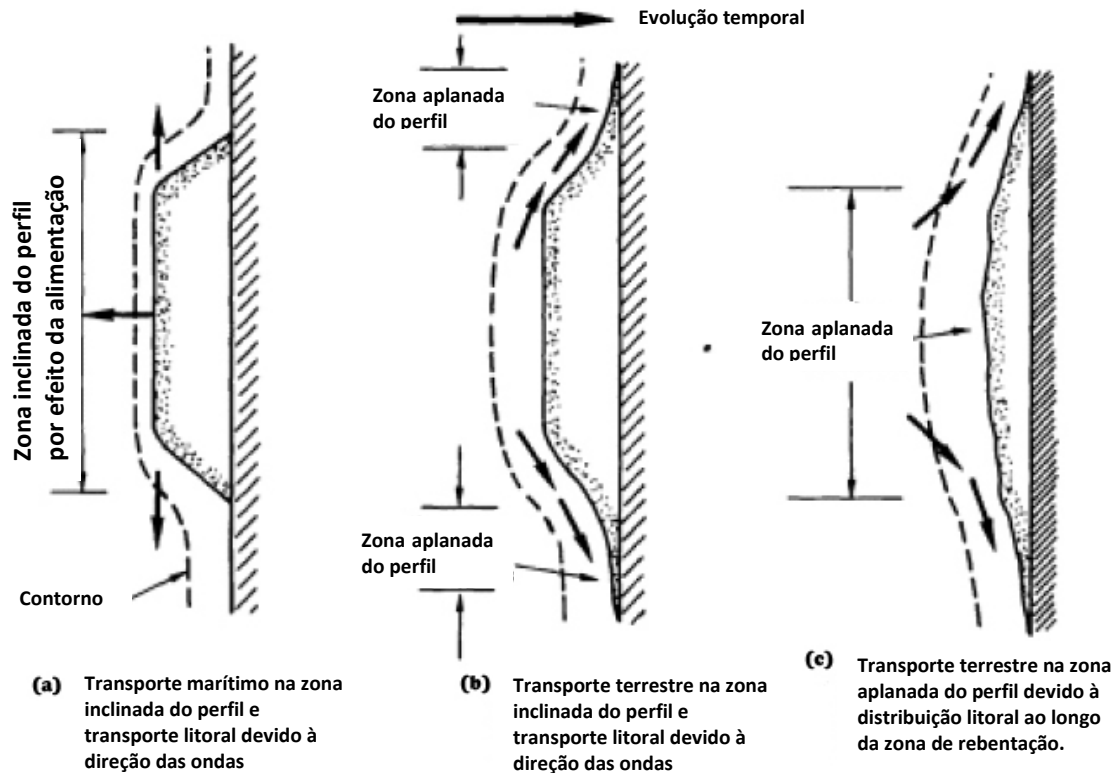


Figura 24 – Três fases do transporte de sedimentos após alimentação artificial de areia. Adaptado de Dean *et al.* (1993).

Assim, atendendo à direção da crista das ondas em 80° WNW e à justificação representada nas Figuras 22 a 24, inicialmente a área que regista mais ganhos é o trecho 2-3, os quais se vão acumulando para o trecho 1-2. Após 10 anos, os efeitos de erosão sobre o trecho 2-3 promovem o transporte de sedimentos preferencialmente para o trecho 3-4, levando a que o máximo ocorra nessa zona.

Principais conclusões

- Qualquer um dos 8 cenários apresenta menor área perdida que o cenário de referência.
- Quanto maior o volume da alimentação artificial, menores são as áreas perdidas, no entanto, não existe nenhuma relação de proporcionalidade entre estes fatores.
- Após 50 anos os efeitos da alimentação praticamente não apresentam diferença nos cenários extremos (área perdida do cenário 8 apenas 2% inferior à do cenário 1).

- Para volumes de alimentação artificial entre 3 a 7 Mm³ a área ainda não perdida consegue-se manter estável ao longo dos 50 anos, o mesmo não acontecendo para os volumes entre 0,5 e 2 Mm³ em que se observa uma diminuição evidente a partir do 15-20 anos.

- Os trechos a Norte da intervenção (1-2 e 2-3) foram menos afetados pela erosão, já que apresentam maiores áreas não perdidas que os trechos a Sul (3-4 e 4-5).

5.3 Análise económico-ambiental dos diferentes cenários

Os objetivos na análise económico-ambiental efetuada apontam para a determinação do volume ótimo de alimentação artificial. Foram calculados três indicadores económicos: o Valor Atual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Ponto de Equilíbrio (PE). Posteriormente, com base na otimização dinâmica (equação 15, capítulo 3.2.4) calculou-se o volume ótimo. Por complemento à análise económico-ambiental, foi efetuada uma análise de sensibilidade de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 3.2.3.

- *Valor Atual Líquido*

Os resultados mostram que o VAL (ver Tabela 11), para áreas de praias e dunas, apenas é positivo no cenário 1 (0,05 M€). Nos cenários restantes o VAL torna-se crescentemente negativo (-1,5 M€ até -28,0 M€). Para áreas urbanas o VAL adquire valores elevados em qualquer dos cenários (de 57 M€ a 208 M€), menores no cenário 1 e maiores no cenário 8, respetivamente. Verifica-se um crescimento que tende a ser menor à medida que o volume de areia é maior, exceção feita à diferença entre os cenários 2 e 3 que é superior à que se verifica entre os cenários 1 e 2.

Tabela 11 - Valor atual líquido (VAL) para áreas de praia e dunas e áreas urbanas (M€).

Cenário	Praia e Dunas	Áreas Urbanas
Cenário 1	0,05	57,51
Cenário 2	-1,52	81,27
Cenário 3	-5,60	109,19
Cenário 4	-9,73	136,24
Cenário 5	-14,11	157,98
Cenário 6	-18,62	176,98
Cenário 7	-23,19	194,82
Cenário 8	-27,99	207,80

A análise de sensibilidade às áreas de praias e dunas protegidas mostra que o VAL, de um modo geral, é positivo para o cenário 1 e o cenário 2 apresenta cerca de metade dos resultados também positivos (ver Tabela 12). Entre os cenários 3 a 5, apenas se observam valores positivos quando os custos são menores e os benefícios são maiores ($C_{[-50]}B_{[+25]}$) e, nos cenários 6 a 8, o VAL é sempre negativo.

Tabela 12 - Análise de sensibilidade ao VAL, para áreas de praia e dunas (M€).

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
CB	0,05	-1,52	-5,60	-9,73	-14,11	-18,62	-23,19	-27,99
CB_[+25]	0,81	-0,40	-4,00	-7,66	-11,63	-15,77	-19,98	-24,48
CB_[-25]	-0,71	-2,64	-7,20	-11,80	-16,58	-21,46	-26,39	-31,49
C_[-25]B	0,80	-0,02	-2,60	-5,23	-8,11	-11,12	-14,19	-17,49
C_[-25]B_[+25]	1,56	1,10	-1,00	-3,16	-5,63	-8,27	-10,98	-13,98
C_[-25]B_[-25]	0,04	-1,14	-4,20	-7,30	-10,58	-13,96	-17,39	-20,99
C_[-50]B	1,55	1,48	0,40	-0,73	-2,11	-3,62	-5,19	-6,99
C_[-50]B_[+25]	2,31	2,60	2,00	1,34	0,37	-0,77	-1,98	-3,48
C_[-50]B_[-25]	0,79	0,36	-1,20	-2,80	-4,58	-6,46	-8,39	-10,49

Nota: - C representa a totalidade dos custos (100%); C₂₅ representa 75% do total de C; C₅₀ representa 50% do total de C; B representa a totalidade dos benefícios (100%); B₊₂₅ representa um valor 25% superior à totalidade de B; B₂₅ representa 75% do total de B;

Efetuada uma análise semelhante para áreas urbanas protegidas (ver Tabela 13), verifica-se que em qualquer dos cenários o VAL atinge sempre resultados positivos, sendo estes mais positivos quanto maior for o volume de areia da intervenção. Obtém-se o valor mais elevado no cenário 8, quando os custos são menores e os benefícios maiores ($C_{[-50]}B_{[+25]}$, 302 M€) e o valor mais baixo no cenário 1, nas condições de custos e benefícios base do estudo (58 M€).

Tabela 13 - Análise de sensibilidade ao VAL, para áreas urbanas (M€).

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
CB	57,51	81,27	109,19	136,24	157,98	176,98	194,82	207,80
CB_[+25]	73,39	104,58	142,49	179,30	209,47	236,22	261,52	280,75
CB_[-25]	41,64	57,95	75,89	93,18	106,48	117,73	128,11	134,85
C_[-25]B	58,26	82,77	112,19	140,74	163,98	184,48	203,82	218,30
C_[-25]B_[+25]	74,14	106,08	145,49	183,80	215,47	243,72	270,52	291,25
C_[-25]B_[-25]	42,39	59,45	78,89	97,68	112,48	125,23	137,11	145,35
C_[-50]B	59,01	84,27	115,19	145,24	169,98	191,98	212,82	228,80
C_[-50]B_[+25]	74,89	107,58	148,49	188,30	221,47	251,22	279,52	301,75
C_[-50]B_[-25]	43,14	60,95	81,89	102,18	118,48	132,73	146,11	155,85

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

A Figura 25 faz a representação do valor atual líquido para áreas de praias e dunas em três cenários selecionados: o cenário base (CB); o cenário otimista ($C_{[-50]}B_{[+25]}$); e o cenário pessimista $CB_{[-25]}$. É possível verificar que o VAL regista uma sensibilidade elevada, atendendo à diferença que se regista entre os diferentes casos observados, sendo que o caso de estudo se aproxima bastante do cenário mais pessimista.

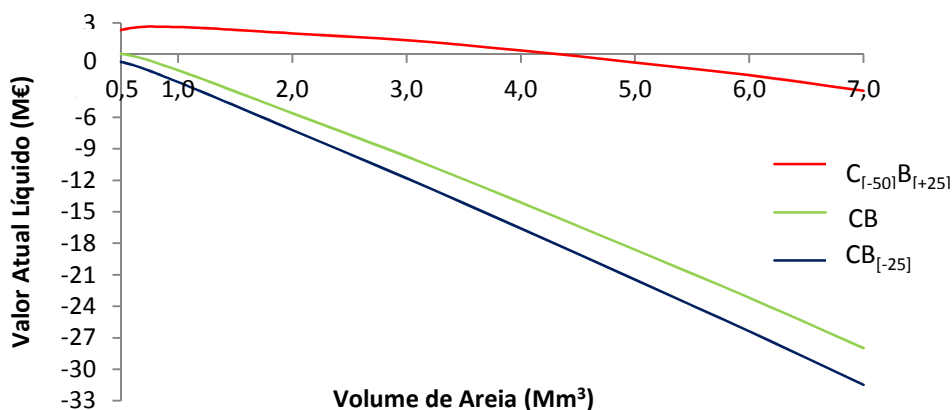


Figura 25 - Análise de sensibilidade ao valor atual líquido para áreas de praia e dunas, nos diferentes cenários (M€/Mm³).

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

Com a Figura 26 pretende-se observar a tendência do VAL para áreas urbanas protegidas nos mesmos três cenários selecionados anteriormente. Verifica-se que o VAL do cenário base, contrariamente ao que se sucede nas áreas de praias e dunas, aproxima-se do valor médio entre os cenários otimista e pessimista.

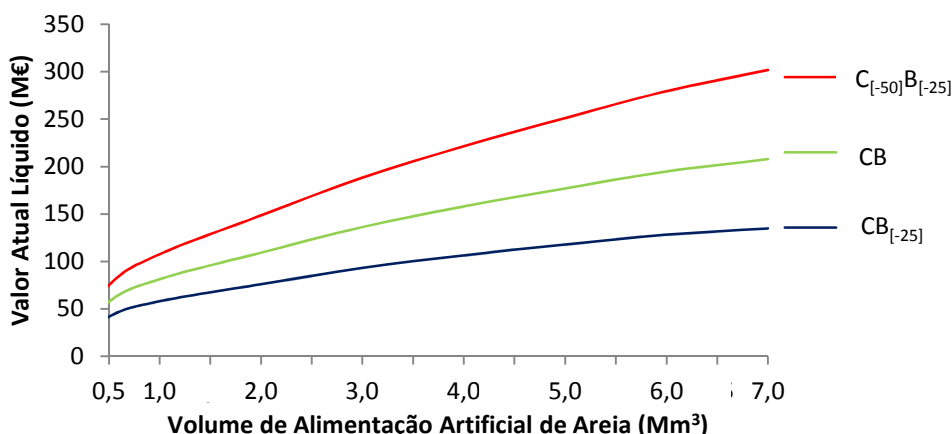


Figura 26 - Análise de sensibilidade ao valor atual líquido para áreas urbanas nos diferentes cenários (M€/Mm³).

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

- *Taxa Interna de Retorno*

Os resultados obtidos para a taxa interna de retorno (Tabela 14) mostram um comportamento análogo ao que se verifica na Tabela 13 para o VAL. Para áreas de praias e dunas protegidas apenas o cenário 1 (5,1%) apresenta valores superiores à taxa de desconto (5%), sendo a TIR inferior a esta nos restantes cenários (entre 0% e 3,1%). Para áreas urbanas a TIR é sempre superior à taxa de desconto, sendo mais elevada no cenário 1 (76%) e decrescendo ao longo dos restantes cenários (entre 56% e 25,3%).

Tabela 14 - Taxa interna de retorno (TIR) para áreas de praia e dunas e áreas urbanas (%).

Cenário	Praias e Dunas	Áreas Urbanas
Cenário 1	5,13	75,75
Cenário 2	3,10	56,09
Cenário 3	1,56	40,21
Cenário 4	1,07	33,96
Cenário 5	0,70	30,65
Cenário 6	0,42	28,49
Cenário 7	0,22	26,79
Cenário 8	0,01	25,29

Ao efetuar a análise de sensibilidade às áreas de praias e dunas protegidas (Tabela 15) verifica-se que a TIR, apresenta mais resultados superiores à taxa de desconto nos cenários 1 e 2. O valor mais elevado foi obtido no cenário 1, quando os custos são reduzidos a metade e os benefícios são superiores em 25% ($C_{[-50]}B_{[+25]}$, 14,9%) e o valor mais baixo no cenário 8, para os custos com o valor de base e os benefícios inferiores em 25% ($CB_{[-25]}$, -1,0%). Para os cenários 3 a 8, a tendência é para a diminuição do valor da TIR, sendo que nos cenários 6 a 8 já não se encontram valores superiores a 5%.

Tabela 15 - Análise de sensibilidade ao TIR para áreas de praia e dunas (%).

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
CB	5,1	3,1	1,6	1,1	0,7	0,4	0,2	0,0
CB_[+25]	7,0	4,5	2,7	2,1	1,6	1,3	1,1	0,9
CB_[-25]	3,1	1,5	0,3	-0,1	-0,4	-0,7	-0,8	-1,0
C_[-25]B	7,6	5,0	3,0	2,4	1,9	1,6	1,4	1,1
C_[-25]B_[+25]	9,9	6,6	4,3	3,5	3,0	2,6	2,3	2,1
C_[-25]B_[-25]	5,1	3,1	1,6	1,1	0,7	0,4	0,2	0,0
C_[-50]B	12,0	8,2	5,4	4,5	3,9	3,5	3,2	2,9
C_[-50]B_[+25]	14,9	10,3	7,0	5,9	5,2	4,7	4,4	4,0
C_[-50]B_[-25]	8,8	5,8	3,7	3,0	2,5	2,1	1,9	1,6

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

A mesma análise para áreas urbanas protegidas (Tabela 16) permite verificar que em qualquer dos cenários a TIR obtém sempre resultados superiores a 5%, sendo mais elevada no cenário 1 quando os custos são menores e os benefícios maiores (C_[-50]B_[+25], 144%) e mais reduzida no cenário 8 quando se tem o valor de base para os custos e os benefícios mínimos (CB_[-25], 20,5%).

Tabela 16 - Análise de sensibilidade à TIR para áreas urbanas (%).

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
CB	75,8	56,1	40,2	34,0	30,7	28,5	26,8	25,3
CB_[+25]	88,5	65,5	47,0	39,7	35,9	33,3	31,4	29,6
CB_[-25]	62,0	45,8	32,7	27,6	24,9	23,2	21,8	20,5
C_[-25]B	92,6	68,5	49,2	41,5	37,5	34,9	32,8	31,0
C_[-25]B_[+25]	108,3	80,0	57,4	48,4	43,8	40,7	38,3	36,1
C_[-25]B_[-25]	75,8	56,1	40,2	34,0	30,7	28,5	26,8	25,3
C_[-50]B	123,3	90,9	65,1	54,9	49,6	46,1	43,4	40,9
C_[-50]B_[+25]	144,8	106,2	75,9	63,9	57,7	53,7	50,5	47,6
C_[-50]B_[-25]	100,6	74,4	53,4	45,1	40,7	37,9	35,6	33,6

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

A Figura 27 mostra a TIR para áreas de praias e dunas para os três cenários já descritos no VAL – base, otimista e pessimista (ver Figuras 25 e 26). É possível verificar que a TIR regista uma sensibilidade elevada, atendendo à distância que se observa entre os diferentes cenários seleccionados, sendo que o cenário base apresenta uma maior aproximação do cenário

pessimista. Distingue-se de forma evidente a tendência para a diminuição da TIR com o aumento do volume de areia da alimentação artificial.

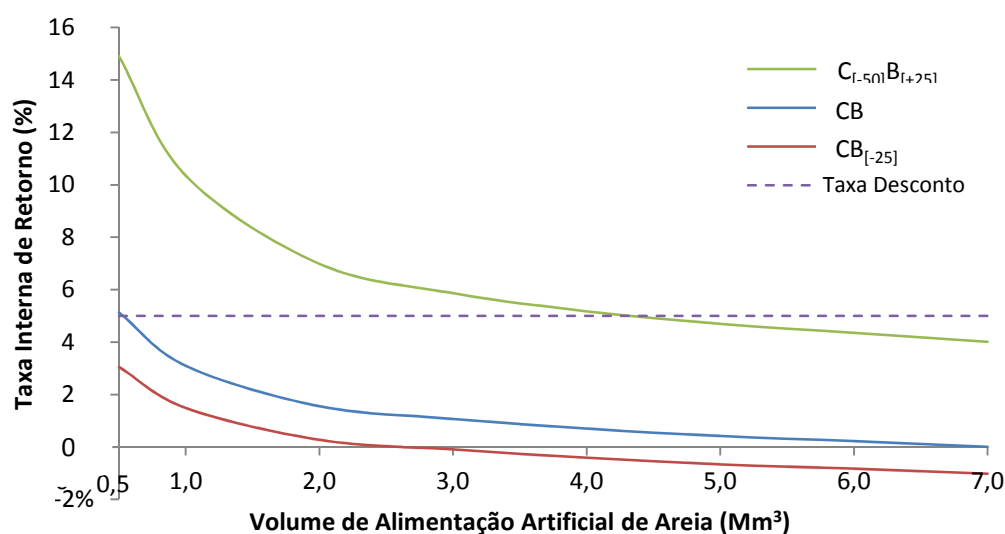


Figura 27 - Análise de sensibilidade à taxa interna de retorno para áreas de praias e dunas, nos diferentes cenários (%/Mm³).

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

De igual modo, a Figura 28 mostra a TIR para áreas urbanas nos mesmos três casos seleccionados para a Figura 27. Verifica-se uma menor amplitude de valores entre os três cenários, estando o cenário base quase à mesma distância dos outros dois cenários, ainda que também se encontre mais próximo do cenário pessimista.

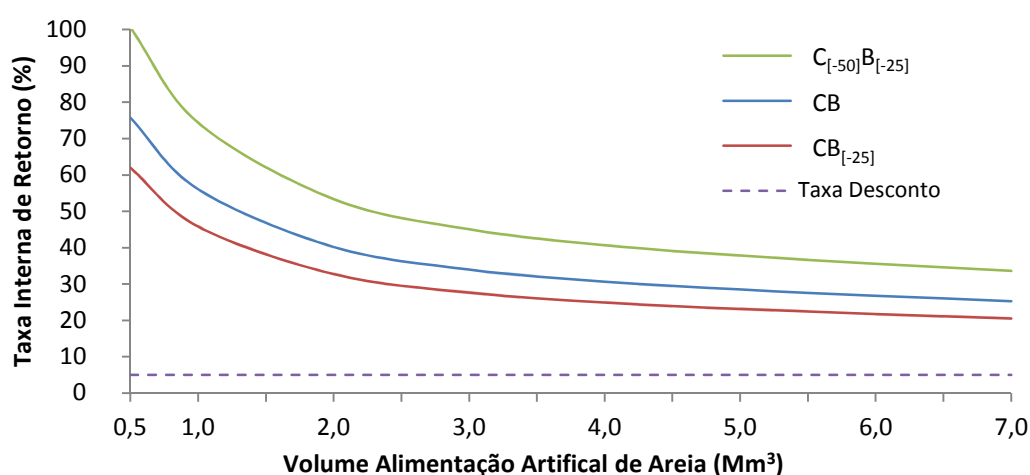


Figura 28 - Análise de sensibilidade à taxa interna de retorno para áreas urbanas, nos diferentes cenários (%/Mm³).

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

- *Ponto de Equilíbrio (PE)*

Todos os resultados para o ponto de equilíbrio (PE) que se seguem são apresentados com arredondamento por excesso, visto tratarem-se de estimativas temporais anuais e arredondamentos por defeito trariam resultados insuficientes. Assim, para áreas de praias e dunas, o PE apenas é obtido no cenário 1 (após 43 anos), sendo que nos restantes cenários, os 50 anos não são suficientes para que este seja atingido (ver Tabela 17). Para áreas urbanas, o PE é atingido num período entre 3 a 6 anos, sendo o tempo mais curto para cenários com volumes de alimentação artificial inferiores (cenário 1 e 2).

Tabela 17 - Ponto de Equilíbrio (PE) para áreas de praia e dunas e áreas urbanas (anos).

Cenário	Praia e Dunas	Áreas Urbanas
Cenário 1	43	3
Cenário 2	>50	3
Cenário 3	>50	4
Cenário 4	>50	5
Cenário 5	>50	5
Cenário 6	>50	5
Cenário 7	>50	6
Cenário 8	>50	6

A análise de sensibilidade às áreas de praias e dunas Tabela 18 mostra que o ponto de equilíbrio (PE), no cenário 1, pode ser atingido entre os 9 anos ($C_{[-50]}B_{[+25]}$) e os 43 anos ($C_{[-25]}B_{[-25]}$), com exceção da situação $CB_{[-25]}$ em que é superior a 50 anos. No cenário 2, os valores do PE variam entre os 13 anos ($C_{[-50]}B_{[+25]}$) e os 50 anos ($C_{[-25]}B$), no entanto, para casos com custos de base e custos e benefícios menores em 25% ($C_{[-25]}B_{[-25]}$), o PE é superior a 50 anos. Nos cenários 3 a 8, os resultados, de um modo geral, são superiores a 50 anos, excetuando os cenários 3 a 5 com períodos inferiores a 50 anos (23 a 45 anos) quando os custos são menores em 50% e os benefícios são superiores 25% ($C_{[-50]}B_{[+25]}$) e também com os benefícios de valor base ($C_{[-50]}B$) – apenas no cenário 3 (39 anos).

Tabela 18 - Análise de sensibilidade ao BEP para áreas de praia e dunas (anos).

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
CB	43	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
CB_[+25]	19	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
CB_[-25]	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
C_[-25]B	17	50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
C_[-25]B_[+25]	13	23	>50	>50	>50	>50	>50	>50
C_[-25]B_[-25]	43	>50	>50	>50	>50	>50	>50	>50
C_[-50]B	10	17	39	>50	>50	>50	>50	>50
C_[-50]B_[+25]	9	13	24	33	45	>50	>50	>50
C_[-50]B_[-25]	14	30	>50	>50	>50	>50	>50	>50

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

Para áreas urbanas (Tabela 19) os resultados mostram que o ponto de equilíbrio é atingido com alguma brevidade (entre 2 a 7 anos). Denota-se que o PE é obtido mais cedo nos cenários 1 e 2, sendo maior com o aumento do volume e, portanto, mais elevado nos cenários 7 e 8.

Tabela 19 - Análise de sensibilidade ao BEP para áreas urbanas (anos).

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
CB	3	3	4	5	5	5	6	6
CB_[+25]	2	3	4	4	4	5	5	5
CB_[-25]	3	4	5	5	6	6	7	7
C_[-25]B	2	3	3	4	4	5	5	5
C_[-25]B_[+25]	2	2	3	4	4	4	4	4
C_[-25]B_[-25]	3	3	4	5	5	5	6	6
C_[-50]B	2	2	3	3	3	4	4	4
C_[-50]B_[+25]	2	2	3	3	3	3	3	4
C_[-50]B_[-25]	2	3	3	4	4	4	5	5

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

- *Otimização Dinâmica*

A determinação do volume ótimo de alimentação artificial de areia ($A_{\#}^*$) representa-se pelo ponto de maior distância entre as curvas de benefícios ($B(A_{\#})$) e custos ($C(A_{\#})$) da alimentação artificial. De acordo com a formulação matemática deduzida no capítulo 3.2.4., sabendo o custo unitário das intervenções ($\alpha_1=6 \text{ €/m}^3$) para definir a curva de custos ($C(A_{\#})$), os parâmetros (γ_1 e γ_2) relativos aos benefícios da alimentação artificial ($B(A_{\#})$) para áreas de praias e dunas e para áreas urbanas foram obtidos por representação gráfica. Assim, para

áreas de praias e dunas, γ_1 e γ_2 , corresponderam a 4×10^6 e 0,5794. Substituindo nas equações 6 (cap. 3.2.1) e 12 (cap. 3.2.4):

$$C(A_{\#}) = 6 \times A_{\#}$$

$$B(A_{\#}) = 4 \times 10^6 \times A_{\#}^{0,5794}$$

Aplicando a equação de otimização dinâmica (eq. 15), estimou-se o volume ótimo de alimentação ($A_{\#}^*$) em $0,1 \text{ Mm}^3$ para os custos e benefícios base.

Como referido anteriormente, este resultado exprime-se graficamente (Figura 29) pelo ponto ótimo ($A_{\#}^*$) localizado sobre a curva de benefícios ($B(A_{\#})$) e cuja distância é máxima à curva de custos ($C(A_{\#})$).

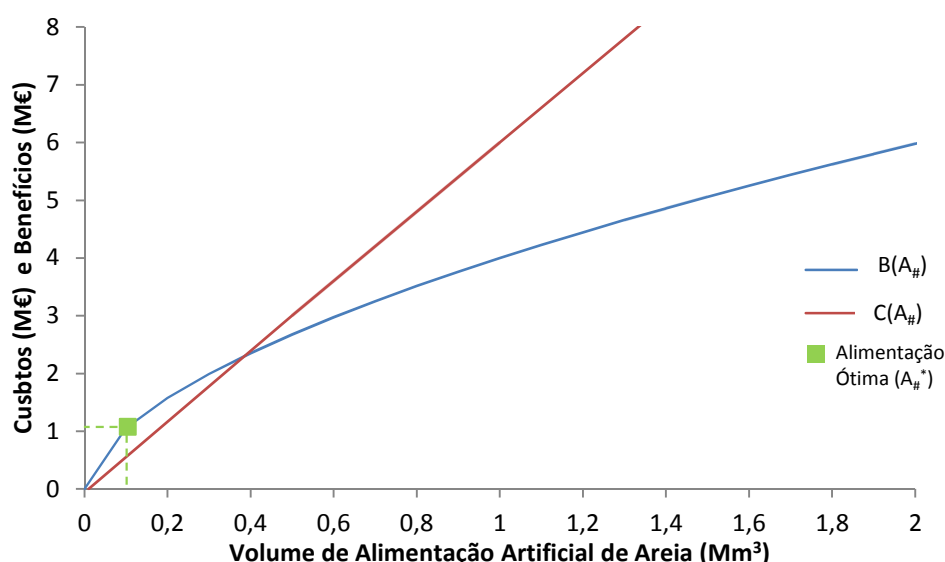


Figura 29 - Relação custos/benefícios em função do volume de areia (Mm^3)

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 12.

Fazendo uma análise de sensibilidade, determinaram-se as curvas de benefícios $\pm 25\%$ ($(B(A_{\#})_{+25})$ e $(B(A_{\#})_{-25})$) e obtiveram-se os parâmetros γ_1 e γ_2 que se encontram resumidos na Tabela 20. Para a definição dos custos ($C(A_{\#})$) fez-se a variação dos custos unitários de alimentação artificial (α_1) em $6 \text{ M€}/\text{Mm}^3$; $4,5 \text{ M€}/\text{Mm}^3$; e $3 \text{ M€}/\text{Mm}^3$.

De seguida procedeu-se ao cálculo das alimentações ótimas, A_1^P até A_9^* , que resultam das 9 combinações possíveis entre os três cenários de custos de alimentação artificial: base ($C(A_{\#})$), 25% inferiores ($C(A_{\#})_{-25}$) e 50% inferiores ($C(A_{\#})_{-50}$); e os três cenários de benefícios: base ($B(A_{\#})$), 25% superiores ($(B(A_{\#})_{+25})$) e 25% inferiores ($(B(A_{\#})_{-25})$). Os resultados indicam que

quanto mais elevados são os benefícios da área protegida e menores os custos de alimentação, o volume ótimo de areia das alimentações artificiais tende a ser maior (ver Tabela 20).

Tabela 20 - Análise de sensibilidade aos valores ótimos de alimentação artificial, para áreas de praia e dunas.

	$B(A_{\#})$ (€/Mm ³)		$B(A_{\#})_{[+25]}$ (€/Mm ³)		$B(A_{\#})_{[-25]}$ (€/Mm ³)		Alimentação Ótima (Mm ³)					
	γ_1	4×10^6	γ_1	5×10^6	γ_1	3×10^6						
	γ_2	0,5794	γ_2	0,5794	γ_2	0,5794						
$C(A_{\#})$ (M€)	α_1	6,0	α_1	6,0	α_1	6,0	A_1^*	0,10	A_4^*	0,18	A_7^*	0,05
$C(A_{\#})_{[-25]}$ (M€)	α_1	4,5	α_1	4,5	α_1	4,5	A_2^*	0,21	A_5^*	0,35	A_8^*	0,10
$C(A_{\#})_{[-50]}$ (M€)	α_1	3,0	α_1	3,0	α_1	3,0	A_3^*	0,54	A_6^*	0,92	A_9^*	0,27

Nota: $C(A_{\#})$ - Custos base da alimentação artificial (em M€); $C(A_{\#})_{[-25]}$ - Custos da AA 25% inferiores (em M€); $C(A_{\#})_{[-50]}$ - Custos da AA 50% inferiores (em M€); $B(A_{\#})$ - Benefícios base das áreas protegidas (€/Mm³); $B(A_{\#})_{[+25]}$ - Benefícios das áreas protegidas superiores 25%; $B(A_{\#})_{[-25]}$ - Benefícios das áreas protegidas inferiores 25%.

A Figura 30 representa as curvas de custos e benefícios em função do volume de areia alimentado em áreas de praia e dunas, nas quais é possível verificar que o volume ótimo é maior quando se observam as curvas onde os benefícios são mais elevados ($B(A_{\#})_{[+25\%]}$) e os custos são menores ($C(A_{\#})_{[-50\%]}$). Numa outra observação, verificando as curvas em que os custos são mais elevados ($C(A_{\#})$) e os benefícios são menores ($B(A_{\#})_{[-25\%]}$), são as que apresentam menor distância entre si e consequentemente menor volume ótimo de areia.

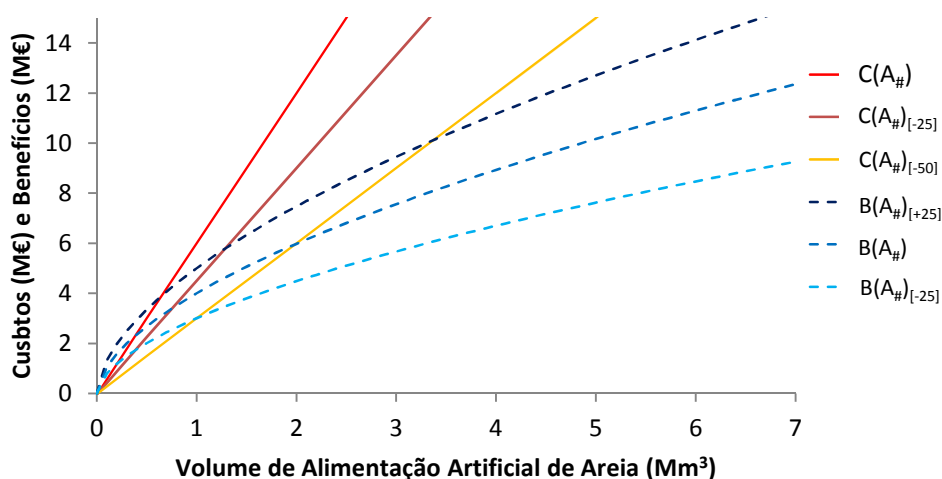


Figura 30 - Análise de Sensibilidade aos custos/benefícios em função do volume de areia (M€/Mm³), para áreas de praias e dunas.

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 20.

As áreas urbanas têm um valor por hectare muito elevado levando a que a determinação dos volumes ótimos seja obtida por extrapolação de estimativas, seguindo uma metodologia análoga à que foi apresentada para as áreas de praias e dunas. Obteve-se assim um volume de alimentação artificial ótimo na ordem dos 90 Mm³, para o cenário base.

A Figura 31 ilustra as curvas de custo e benefício em função do volume de areia alimentado, mostrando que neste caso os benefícios são muito mais elevados do que os custos das operações de alimentação artificial. Também é visível que a diferença entre benefícios e custos vai sendo maior com o aumento do volume de areia da intervenção.

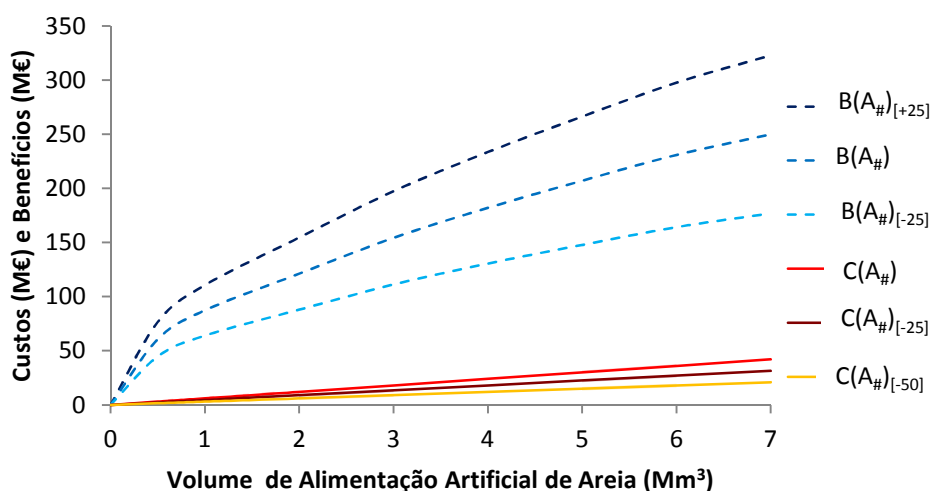


Figura 31 - Análise de Sensibilidade aos custos/benefícios em função do volume de areia (M€/Mm³), para áreas urbanas.

Nota: o desenvolvimento da notação CB encontra-se na Tabela 20.

5.3.2 Discussão

Numa análise custo-benefício são aplicadas algumas ferramentas económicas que permitem ao decisor avaliar a viabilidade dos projetos, nomeadamente, o valor atual líquido, a taxa interna de retorno e o ponto de equilíbrio.

A maioria dos projetos tem uma visão a uma escala temporal alargada, sendo importante poder comparar o seu valor atual com o valor futuro, visto normalmente existirem custos no tempo de vida inicial e posteriormente usufrui-se dos benefícios gerados. Considerando que neste estudo o tempo de vida do projeto foi fixado em 50 anos, adotou-se uma taxa de desconto de 5%.

- Valor atual líquido e Taxa Interna de Retorno

Os resultados para o Valor Atual Líquido (VAL) e para a Taxa Interna de Retorno (TIR) são coerentes entre si e como tal, faz sentido que a sua discussão seja feita de forma conjunta. O VAL e a TIR do cenário base (CB), para áreas de praia e dunas protegidas (β_1 igual a 29.755 €/ha/ano), apenas apresentam valores relevantes ($VAL > 0$ e $TIR > 5\%$), no cenário 1, para o qual o VAL é de 0,05 M€ e a TIR é de 5,13%, mostrando que os cenários 2 a 8 não são projetos viáveis, uma vez que os custos estimados são superiores aos benefícios retirados ao longo dos 50 anos, e sendo o VAL e a TIR tanto menores quanto maior for o volume de areia adicionado.

Quando se consideram áreas urbanas, para o cenário base (β_2 igual a 619.525 €/ha/ano), verifica-se que os resultados para o VAL e para a TIR são satisfatórios correspondendo, em qualquer dos 8 cenários, a um VAL positivo (superiores a 57 M€) e a TIR superior a 5% (superiores a 25%), confirmando o interesse na intervenção em áreas urbanas dados os elevados benefícios que se retiram. Regista-se uma diferença relativamente ao que se sucede para as áreas de praias e dunas, por um lado, o VAL aumenta com o respetivo aumento do volume de areia, por outro lado, com a TIR a tendência verificada é inversa, ou seja, quanto maior o volume de areia na intervenção, menor a TIR correspondente. Estes resultados mostram que o investimento para a proteção de áreas de praias e dunas é vantajoso quando se aplicam volumes inferiores ou iguais a 1 Mm³ e que é importante o estudo da intervenção no sentido de reduzir os custos, pois estes têm uma influência importante nos resultados obtidos.

A análise de sensibilidade aplicada aos dois parâmetros (VAL e TIR) para as áreas de praias e dunas e áreas urbanas protegidas permite observar duas situações distintas. A determinação do VAL e da TIR, para áreas de praias e dunas, mostra que os benefícios estimados representam valores reduzidos face aos custos da alimentação artificial. Para elevados volumes de alimentação artificial de areia os custos vão aumentando significativamente, e os benefícios retirados com a área protegida não são suficientes para tornar o projeto viável. Assim, justifica-se que o VAL e a TIR vão diminuindo entre os cenários 1 e 8.

A mesma análise para áreas urbanas apresenta resultados diferentes. Quando se verifica o VAL, nota-se que há uma tendência para este ser maior com o aumento do volume de areia alimentado, mostrando que os benefícios estimados são elevados relativamente aos custos da alimentação artificial. A variação dos custos (- 25% e -50%) permite verificar que o valor do VAL

sofre aumentos pouco relevantes, no entanto, as variações nos benefícios são bem mais expressivas nos resultados. Em relação à TIR, observa-se uma situação oposta à que ocorre com o VAL, já que a variação dos custos provoca maior sensibilidade nos resultados do que a alteração dos benefícios. Apesar deste comportamento oposto entre VAL e TIR, os resultados mostram que as intervenções para proteger áreas urbanas são sempre rentáveis, independentemente do volume de alimentação artificial considerado.

- *Ponto de equilíbrio*

O ponto de equilíbrio permite determinar o período em que o investimento é recuperado. No caso de estudo aplicado a áreas de praia e dunas, apenas o cenário 1 apresenta resultados dentro da escala temporal deste estudo (43 anos). Para os restantes cenários o prazo de retorno excede o tempo de vida do projeto. Para áreas urbanas, verifica-se que o período de retorno ocorre entre 3 e 6 anos, respetivamente para o cenário 1 e 8. Destes valores conclui-se que justifica realizar operações de alimentação artificial após 3 anos da primeira alimentação.

Da análise de sensibilidade para áreas de praia e dunas pode-se concluir que há uma instabilidade grande nos cenários 1 e 2, e portanto nestes casos, o período de retorno pode variar entre os 9 os 50 anos, consoante os custos e benefícios apresentados, levando a concluir que a realimentação, em cenários com volumes menores de areia poderá ser considerada dentro da escala temporal admitida (50 anos). Para áreas urbanas verifica-se que o retorno financeiro ocorre de forma relativamente rápida em qualquer dos cenários, levando a concluir que o elevado valor dos benefícios das áreas protegidas é uma justificação para que se deva proceder a realimentações no intervalo obtido (2 a 7 anos), consoante o cenário selecionado.

- *Otimização dinâmica*

Um dos principais objetivos desta tese passou pela determinação do volume ótimo de alimentação para áreas de praia e dunas e para áreas urbanas, para as quais se obteve, respetivamente, 0,1 Mm³ e aproximadamente 90 Mm³. Estes resultados representam a quantidade ótima a aplicar numa operação de alimentação artificial de modo maximizar os benefícios estimados para as áreas de praias e dunas e áreas urbanas, para cada valor determinado de custos e de benefícios. Assim, tendo em conta que o valor por hectare dos ecossistemas costeiros é 30 vezes inferior ao das áreas urbanas, compreende-se que o interesse em investir fosse muito maior para proteger uma área cujos benefícios são elevados. Por outro lado, a proteção duma área da qual se retirará menos benefícios será menos

atraente para o investimento. A análise de sensibilidade permite concluir que o volume ótimo é máximo quando os custos são mínimos e os benefícios mais elevados, justificando assim a colocação de um volume maior de areia.

Principais conclusões

- A utilização de vários indicadores económicos é vantajosa, pois por si só, cada um devolver más indicações.
- Na situação de proteção de áreas de praias e dunas, os resultados mostram que apenas o cenário 1 é exequível, por se tratar do único cenário com Valor Atual Líquido positivo (0,05 M€) e uma Taxa Interna de Retorno (5,13%) superior à taxa de desconto (5%). O tempo necessário para recuperar o investimento (ponto de equilíbrio) seria de 43 anos.
- Na situação de proteção de áreas urbanas, os resultados são diferentes, na medida em que todos os cenários estudados são recomendáveis, por apresentarem todos valores positivos do VAL e TIR acima e 5%. Os períodos de retorno variam entre 2 a 7 anos.
- Quando o valor associado aos benefícios da proteção é reduzido (áreas de praias e dunas), os custos elevados inviabilizam os projetos. Por outro lado, quando os benefícios da proteção são elevados (áreas urbanas), os custos são menos determinantes enquanto fator para tomar uma decisão.
- Os resultados alcançados nas áreas urbanas protegidas sugerem que independentemente do volume a alimentar, as intervenções por alimentação artificial de areia nestas áreas são muito benéficas e a recomendação vai no sentido que estas realizem, se possível, com realimentações periódicas (neste caso, o período estimado ocorre entre 2 e 7 anos).
- A otimização dinâmica pretende maximizar os benefícios das áreas protegidas face aos custos da alimentação artificial, em função dos volumes de alimentação artificial. Assim, para a situação de praias e dunas protegidas, o volume ótimo foi de 0,1 Mm³. Para as áreas urbanas o valor é uma extrapolação de estimativas e resultou em 90 Mm³. O facto de estes valores serem maiores ou menores não implica a qualidade dos mesmos, apenas estão adequados às condições das quais resultam.

Capítulo 6 – Conclusões

6.1 Considerações finais

Neste estudo efetuou-se uma análise económico-ambiental a um tipo de intervenção de proteção costeira, nomeadamente, a alimentação artificial de praias. Para tal, foram definidos quatro objetivos principais:

- Avaliação da evolução da linha de costa, através de um modelo numérico (LTC) e respetiva simulação de diversos cenários em que apenas o volume das alimentações artificiais sofreu variação. Foi utilizada uma configuração de linha de costa perfeitamente linear, sem entrada de fluxo de sedimentos a Norte, mas com saída regular a Sul, batimetria regular, altura de onda de 1,5 m e direção 80º com o Norte Cartográfico (WNW).
- Estimativa de custos da proteção costeira, através da caracterização de metodologias e tecnologias do processo de alimentação artificial e respetivos custos associados. Pela revisão de casos reais em Portugal, apresentados na Tabela 3 (cap. 3.2.1), definiu-se o valor unitário da AA em 6 €/m³. Para efeitos de análise de sensibilidade foram considerados também custos 25% inferiores (4,5 €/m³) e 50% inferiores (3 €/m³).
- Estimativa de benefícios da proteção costeira, através da definição do valor dos ecossistemas naturais (29.755,34 €/ha/ano) por uma metodologia de transferência de benefícios e do valor das áreas urbanas (619.524,88 €/ha/ano), efetuando o cálculo a partir de dados estatísticos da construção em Portugal. A análise de sensibilidade foi concretizada com a variação dos benefícios em valores superiores e inferiores em 25%.
- Análise económico-ambiental, através de indicadores económicos que permitem suportar as conclusões deste estudo. Neste âmbito foi determinado o Valor Atual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Ponto de Equilíbrio (PE). Através da definição das funções de custo e benefício, foi possível obter o volume ótimo da AA para duas situações: áreas de praia e dunas e áreas urbanas.

Do ponto de vista físico, os principais resultados mostram que o condicionamento na fronteira Norte do sistema induziu uma maior erosão no trecho Norte (1-2), sendo que no trecho Sul (4-5) praticamente não se verificaram fenómenos de erosão/acreção. Verificou-se que a área ainda não perdida não cresce de forma proporcional com o volume de areia adicionado, sendo que para volumes muito grandes, os ganhos marginais são sendo menores. Em termos de

distribuição espacial, as duas regiões vizinhas à zona onde é realizada a AA são as que registam mais área não perdida, a qual se manteve estável ao longo dos 50 anos de estudo. Qualquer dos cenários simulados trouxe melhorias em termos de área perdida, em relação ao cenário de referência.

Do ponto de vista económico, os principais resultados mostram que, para a situação de praias e dunas, apenas o cenário 1 é viável ($0,5 \text{ Mm}^3$), por ser o único com resultado positivo para o VAL ($0,05 \text{ M€}$) e TIR ($5,13\%$) superior à taxa de desconto. A análise de sensibilidade mostrou que o cenário 2 também apresenta resultados a considerar noutras condições (custos mais baixos, benefícios mais elevados). Para áreas urbanas, qualquer cenário surge como recomendável à sua concretização, no entanto, analisando as tendências do VAL e da TIR. A otimização dinâmica efetuada permitiu determinar, para áreas de praias e dunas, um volume ótimo de $0,1 \text{ Mm}^3$, já para áreas urbanas, o volume ótimo determinado foi de 90 Mm^3 . Este valor traduz o volume de alimentação artificial para o qual é possível maximizar os benefícios das áreas protegidas, em relação ao investimento efetuado nas intervenções. A Tabela 21 e a Tabela 22 apresentam o resumo dos resultados obtidos ao longo deste estudo, para áreas de praias e dunas e áreas urbanas, relativamente aos valores obtidos nos cenários base e a uma gama de valores determinados na análise de sensibilidade.

Tabela 21 - Quadro resumo da análise económico-ambiental realizada para o caso de estudo base e os respetivos extremos obtidos pela análise de sensibilidade, para áreas de praias e dunas.

	VAL (M€)	TIR (%)	PE (Anos)	OD (Mm^3)
Cenário 1	$-0,71 < \underline{0,05} < 2,31$	$3,1 < \underline{5,1} < 14,9$	$9 < \underline{43} < 50$	
Cenário 2	$-2,64 < \underline{-1,52} < 2,60$	$1,5 < \underline{3,1} < 10,3$	$[13 > \underline{50}]$	
Cenário 3	$-7,20 < \underline{-5,60} < 2,00$	$0,3 < \underline{1,6} < 7,0$	$[39 > \underline{50}]$	
Cenário 4	$-11,8 < \underline{-9,73} < 1,34$	$-0,1 < \underline{1,1} < 5,9$	$[33 > \underline{50}]$	
Cenário 5	$-16,58 < \underline{-14,11} < 0,37$	$-0,4 < \underline{0,7} < 5,2$	$[45 > \underline{50}]$	$0,05 < \underline{0,10} < 0,92$
Cenário 6	$-21,46 < \underline{-18,62} < -0,77$	$-0,7 < \underline{0,4} < 4,7$	$> \underline{50}$	
Cenário 7	$-26,39 < \underline{-23,19} < -1,98$	$-0,8 < \underline{0,2} < 4,4$	$> \underline{50}$	
Cenário 8	$-31,49 < \underline{-27,99} < -3,48$	$-1,0 < \underline{0,0} < 4,0$	$> \underline{50}$	

Nota: VAL – Valor Atual Líquido; TIR – Taxa Interna de Retorno; PE – Ponto de Equilíbrio; OD – Otimização Dinâmica.

Tabela 22 - Quadro resumo da análise económico-ambiental realizada para o caso de estudo base e os respetivos extremos obtidos pela análise de sensibilidade, para áreas urbanas.

	VAL (M€)			TIR (%)			PE (Anos)			OD (Mm ³)		
Áreas Urbanas	Cenário 1	41,6<	<u>57,5</u>	<74,9	62,0<	<u>75,8</u>	<144,8	1,1<	<u>2,1</u>	<2,4		
	Cenário 2	58,0<	<u>81,3</u>	<107,6	45,8<	<u>56,1</u>	<106,2	1,5<	<u>2,7</u>	<3,2		
	Cenário 3	75,9<	<u>109,2</u>	<148,5	32,7<	<u>40,2</u>	<75,9	2,1<	<u>3,6</u>	<4,3		
	Cenário 4	93,2<	<u>136,2</u>	<188,3	27,6<	<u>34,0</u>	<63,9	2,4<	<u>4,2</u>	<5,0		
	Cenário 5	106,5<	<u>158,0</u>	<221,5	24,9<	<u>30,7</u>	<57,7	2,6<	<u>4,6</u>	5,5	32,2<	<u>92,8</u>
	Cenário 6	117,7<	<u>177,0</u>	<251,2	23,2<	<u>28,5</u>	<53,7	2,8<	<u>4,9</u>	5,9		
	Cenário 7	128,1<	<u>194,8</u>	<279,5	21,8<	<u>26,8</u>	<50,5	3,0<	<u>5,2</u>	6,3		
	Cenário 8	134,9<	<u>207,8</u>	<301,8	20,5<	<u>25,3</u>	<47,6	3,1<	<u>5,5</u>	<6,7		

Nota: VAL – Valor Atual Líquido; TIR – Taxa Interna de Retorno; PE – Ponto de Equilíbrio; OD – Otimização Dinâmica.

A utilização de instrumentos económicos na gestão de zonas costeiras é uma prática pouco comum em Portugal, contrariamente à experiência em alguns países da OCDE, sendo importante o aprofundamento do seu potencial de aplicação (OECD, 2011). A análise de perdas de serviços de ecossistemas devido à erosão costeira já tem vindo a ser utilizada para desenvolver a ferramenta Coastal Protection Investment Support Tool (COPIST), que visa ajudar os gestores de zonas costeiras a identificar localizações ótimas para realizar intervenções de proteção costeira. Estes estudos, suportados por uma apropriada transferência de resultados de outros países para Portugal, podem dar uma base útil para o uso de ferramentas analíticas como análises custo-benefício na gestão de zonas costeiras. (Markandya et al., 2008)

É possível enquadrar o presente estudo no âmbito do COPIST, uma vez que integra os diversos elementos utilizados na metodologia desta ferramenta, nomeadamente, a definição de custos da proteção costeira e respetivos benefícios económicos com base no uso do solo e uma abordagem económico-ambiental que procura determinar a solução ótima para o tipo de intervenção de proteção costeira proposto (alimentação artificial de praias) (Alves *et al.*, 2009). Espera-se, então, que a abordagem seguida neste estudo seja útil e possa contribuir para suportar os decisores na definição de políticas integradas de gestão de zonas costeiras.

6.2 Considerações futuras

Este estudo incidiu sobre uma análise económico-ambiental a intervenções de alimentação artificial aplicadas a um caso genérico, tratando-se de um tipo de estudo que não se encontra

muito desenvolvido na literatura. Existem vários estudos em que se promove a integração da modelação com a análise económico-ambiental, no entanto, são sempre aplicados a casos de estudo muito específicos o que, por vezes, dificulta a sua comparação com outros casos reais e/ou mais gerais.

No entanto, são apontadas algumas críticas à abordagem custo-benefício que importa ter em consideração, nomeadamente, a falsa precisão, por incluir valores estimados que não podem ser quantificados diretamente; poder servir interesses próprios, isto é, as análises podem ser conduzidas de modo a que as opções que se tomam condicionem as alternativas disponibilizadas; desconsidera a equidade social, isto é, a análise custo-benefício baseia-se na disponibilidade para pagar por algo, logo está dependente da capacidade de se poder pagar, e a riqueza encontra-se distribuída de forma desigual. Importante também será perceber que a análise custo-benefício baseia-se na elaboração de alternativas a um cenário base, e que enquanto estimativas estão sujeitas a alterações não consideradas quando se efetuam as previsões (DFA, 2006). Turner *et al.* (2007) referem ainda que o método clássico de análise custo-benefício não é apropriado quando se tratam de projetos em que se pretendam aplicar estratégias de gestão flexíveis. As mudanças a este método sugeridas por estes autores descrevem, entre outros, mudanças de escala espacial e temporal, bem como, taxas de descontos variáveis ao longo do tempo. De um modo geral, o mais importante é que estas limitações estejam presentes quando se trata de analisar e tomar decisões sobre projetos, para que possam ser interpretadas de forma consciente.

Por se pretender tratar de um caso genérico, tem-se desde logo que proceder a várias simplificações, permitindo que os resultados possam ser extrapolados para outras situações, com os devidos cuidados de interpretação. Das várias condicionantes aplicadas, as que provocarão mais impactos serão as condições fronteira, por ter sido definida a não existência de fluxos de sedimentos a Norte do sistema. No entanto, é importante referir que os resultados obtidos neste trabalho têm significado nas condições definidas para o sistema ao nível da altimetria, características das ondas, sedimentos e outros, adaptados ao contexto da realidade portuguesa. Daí a importância de outros estudos que, mantendo o carácter genérico, permitam compreender os comportamentos que lhes estão associados, não só pela variação das condições atrás referidas, como também com a conjugação com outras estruturas de proteção costeira.

Para a análise económico-ambiental seria interessante não só a avaliação individual de vários tipos de uso de solo, como também a integração destes, de modo a obter resultados que possam ser extrapolados para casos de estudo específicos. Também se impõe a problemática da localização das diferentes formas e tamanhos das obras de defesa costeira.

É importante que se continuem a desenvolver estudos que apresentem uma visão integrada, já que as decisões não podem ser baseadas exclusivamente na vertente económica, uma vez que se pretende uma sociedade sustentável e, portanto, o equilíbrio entre os vetores ambiental, social e económico.

Referências Bibliográficas

Alves, F., Roebeling, P., Pinto, P. & Batista, P. (2009) "Valuing ecosystem service losses from coastal erosion using a benefits transfer approach: a case study for the Central Portuguese coast." *Journal of Coastal Research*, 1169-1173.

Bakker, W. T. (1968) "The dynamics of a coast with a groin system." *Proceedings of the 11th Coastal Engineering Conference, ASCE*, 492–517.

Bayram, A., Larson, M., Miller, H. C. & Kraus, N. C. (2001) "Cross distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements." *Coastal Engineering* 44, 79–99.

Bergh, J. e Nijkamp, P. (1998) "Advances in Environmental Economics: Analysis and Modelling." *Tinbergen Institute Discussion Papers*.

Bergland, O. (2006) "Benefit Transfer: A Hierarchical Bayesian Approach." *Asia-Pacific School of Economics and Government, The Australian National University, Canberra*.

Bergstrom, J. e De Civita, P. (1999) "Status of benefit transfer in the United States and Canada: a review." *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 47, 79-87.

Bergstrom, J. C. e Taylor, L. O. (2006) "Using meta-analysis for benefits transfer: Theory and practice." *Ecological Economics*, 60, 351-360.

Bosello, F., Roson, R. e Tol, R. (2007) "Economy-wide Estimates of the Implications of Climate Change: Sea Level Rise." *Environmental & Resource Economics. Springer*, 37, 549–571.

Bossard, M., Feranec, J. e Otahel, J. (2000) "CORINE land cover technical guide – addendum 2000." 284 EEA Technical Report No. 40/2000, European Environment Agency, 105p.

Boyle, K., Kuminoff, N. V., Parmeter, C. e Pope, J. C. (2010) "The Benefit-Transfer Challenges." *Annual Review of Resource Economics*, 2, 161-182.

Boyle, J. e Bergstrom, J. C. (1992) "Benefit Transfer Studies: Myths, Pragmatism, and Idealism." *Water Resources Research*, 28, 657– 663.

Brealey, R. A., Myers, S. C. & Marcus, A. J. (2001) "Fundamentals of Corporate Finance - Third Edition." Phoenix, McGraw-Hill Primis Custom Publishing.

Brouwer, R. (2000) "Environmental value transfer: state of the art and future prospects." *Ecological Economics*, 32, 137-152.

Brundson, C. e Willis, K. (2002) "Meta-Analysis: A Bayesian Perspective, in Comparative Environmental Economic Assessment." ed. por R. J. G. M. Florax, P. Nijkamp, and K. Willis, Cheltenham: Edward Elgar, 189-210.

Burchartch, H. F. e Hughes, S. A. (2001) "Coastal Engineering Manual, Part VI, Chapter 2 - Types and Functions of Coastal Structures." Washington D.C., U.S. Army Corps of Engineers.

Burke, L., Kura, Y., Kassem, K., Revenga, C., Spalding, M. e McAllister, D. (2000) "Coastal Ecosystems." Washington DC: World Resources Institute.

Camenen, B. e Larroudé, P. (2003) "Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment." *Coastal Engineering*, 48, 111–132.

Carpinteiro, F. (2009) "Transposição artificial de areias na barra de Aveiro". Tese de Mestrado apresentada à Universidade de Aveiro.

Carreau, P. R. e Gallego, F. J. (2006) "EU25 coastal zone population estimates from the disaggregated population density data 2001". DG Joint Research Centre.

Clímaco, M., Fortunato, A. B., Oliveira, F., Oliveira, A., Sancho, F. e Freire, P. (2008) "Dinâmica Fisiográfica da Orla Costeira: Estudos de Reabilitação e Protecção." *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 8, 45-63.

Clímaco, M., Oliveira, F. & Vicente, C. (2005) "Manutenção e Melhoramento da Praia de Porto Santo." III Congresso Sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. Maputo.

Coelho, C. (2005) "Riscos de Exposição de Frentes Urbanas Para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira". Tese de Doutoramento apresentada à Universidade de Aveiro.

Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. e Rodrigues, L. (2010) "Artificial Nourishment And Sand By-Passing In The Aveiro Inlet, Portugal – Numerical Studies." *Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering*.

- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F. & Taveira-Pinto, F. 2009. "Potential effects of climate change on northwest Portuguese coastal zones." *ICES Journal of Marine Science*, 66, 1497-1507.
- Costa, L., Tekken, V. & Kropp, J. (2009) "Threat of sea level rise: Costs and benefits of adaptation in European Union coastal countries." In: RESEARCH, J. O. C., ed. SI 56 - Proceedings of the 10 th International Coastal Symposium, 2009 Lisbon, Portugal. 223-227.
- Costanza, R., Darge, R., Degroot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Oneill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. e Vandenbelt, M. (1997) "The value of the world's ecosystem services and natural capital." *Nature*, 387, 253-260.
- Darwin, R. e Tol, R. (2001) "Estimates of the Economic Effects of Sea Level Rise." *Environmental & Resource Economics*. Kluwer Academic Publishers, 19, 113-129.
- Davies, A. G., Van Rijn, L. C., Damgaard, J. S., Van De Graaff, J. e Ribberink, J. S. (2002) "Intercomparison of research and practical sand transport models." *Coastal Engineering*, 46:, 1-23.
- Davies, A. (2002) "Prediction of sand transport rates by waves and currents in the coastal zone." *Continental Shelf Research*, 22, 2725-2737.
- Dean, R. G. (2002) "Beach nourishment: theory and practice." World Scientific Press, Singapore.
- Dean, R. G., Healy, T. R. & Dommerholt, A. (1993) "A "blind-folded" test of equilibrium beach profile concepts with New Zealand data." *Marine Geology*, 109.
- DEFRA (2004) "Managing coastal activities: a guide for local authorities." Crown.
- Deke, O., Hooss, K. G., Kasten, C., G., K. K., S. (2001) "Economic Impact of Climate Change: Simulations with a Regionalized Climate-Economy Model." Kiel Institute of World Economics, Kiel.
- DFA (2006) "Handbook of Cost-Benefit Analysis." Australia, Financial Management Group.
- DGOTDU (2007) "Plano Nacional de Políticas de Ordenamento do Território." Direcção Geral de Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano.

Dias, J. M. A., Boski, T., Rodrigues, A. e Magalhaes, F. (2000) "Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present - a synthesis." *Marine Geology*, 170, 177-186.

Downing, M. e Ozuna, T. (1996) "Testing the reliability of the benefit function transfer approach." *Journal of Environmental Economics and Management*, 30, 316-322.

Ekphisutsuntorn, P., Wongwises, P., Chinnarasri, C., Humphries, U. e Vongvisessomjai, S. (2010) "Numerical Modeling of Erosion for Muddy Coast at Bangkhuntien Shoreline, Thailand." *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2.

EU (2000) "Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on Integrated Coastal Zone Management: A Strategy for Europe." COM(2000) 547 final.

EU (2002) "Recommendation of the European Parliament and of the Council concerning the implementation of Integrated Coastal Zone Management in Europe." *Official Journal of the European Communities*, (2002/413/EC).

EU (2006) "Environmental European Report." Copenhagen.

EUROSTAT 2010. NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics. [Em Linha]: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/nuts_nomenclature/introduction [acedido a 15/04/2011]

Falqués, A., Calvete, D., De Swart, H. E. e Dodd, N. (1998) "Morphodynamics of shoreface-connected ridges." *Proceedings of the 26th Coastal Engineering Conference, ASCE*, 2851-2864.

Fankhauser, S. (1994) "Protection vs Retreat: estimating the costs of sea level rise." In: (CSERGE), C. F. S. A. E. R. O. T. G. E. (ed.). Norwich (United Kingdom).

Fontão, F. (2008) "Intervenções de defesa em zonas costeiras." *Projeto de Fim de Licenciatura em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro*.

Fortunato, A. B., Freire, P., Oliveira, M. A. e Andrade, C. (2008) "The effect of sediment characteristics in littoral transport evaluation." *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*.

Gallego, F. J. (2006) "Gridded population density in the EU from commune data and land cover information." In: *European Population Conference, 21-24 June 2006, Liverpool*.

Gomes, F. V. (2007) "A Gestão da Zona Costeira Portuguesa." *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 1, 83-95.

Groothuis, P. A. (2003) "Benefit transfer: a comparison of approaches." *Growth and Change*, 36, 551-564.

Hanley, N. e Barbier, E. (2009) "Pricing Nature Cost-Benefit Analysis and Environmental Policy." Edward Elgar Publishing Limited.

Hanson, H. (1989) "Genesis—a generalized shoreline change numerical model." *Journal of Coastal Research*, 5, 1–27.

Hanson, H., Aarninkhof, S., Capobianco, M., Jiménez, J. A., Larson, M., Nicholls, R. J., Plant, N. G., Southgate, H. N., Steetzel, H. J., Stive, M. J. F. e Vriend, H. J. (2003) "Modelling of Coastal Evolution on Yearly to Decadal Time Scales." *Journal of Coastal Research*, 19, 790-811.

Hanson, H., Kraus, N. e Gravens, M. (1991) "Genesis: Generalized Model For Simulating Shoreline Change. Report 2. Workbook and System User's Manual." Washington D.C., U.S. Army Corps of Engineers.

Hinkel, J. e Klein, R. (2003) "DINAS-COAST: Developing a Method and a Tool for Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment." *Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone*, 27.

Hinkel, J. e Klein, R. (2009) "Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool." *Global Environmental Change*, 19, 384–395.

ICI 2010. "O Sector da Construção Em Portugal em 2010." Direcção de Análise de Mercados, Ministério da Economia e do Emprego.

IMAGE-TEAM (2001) "The IMAGE 2.2 Implementation of the SRES Scenarios." RIVM CDROM Publication 481508018, Bilthoven, The Netherlands.

INAG (2007) "Alimentação artificial das praias da costa da Caparica e de S. João da Caparica." 2p.

INAG (2008) "Alimentação artificial das praias da costa da Caparica e de S. João da Caparica." 2p.

INAG (2009) "Alimentação artificial das praias da costa da Caparica e de S. João da Caparica." 2p.

Ionescu, C., Klein, R. J. T., Hinkel, J., Kumar, K. S. e Klein, R. 2009. "Towards a formal framework of vulnerability to climate change." *Environmental Modeling and Assessment* 14.

IPCC (1990) "Strategies For Adaption To Sea Level Rise." In: IPCC (ed.).

Lakhan, V. C. (2003) "Advances in coastal modeling." Elsevier.

Larson, M. e Kraus, N. C. (1989) "SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change. Report 1: Theory and model foundation." Vicksburg, MS: Coastal Engineering Research Center, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report CERC-89-9.

Linham, M. M. e Nicholls, R. J. (2010) "Technologies for Climate Change Adaptation: Coastal Erosion and Flooding." TNA Guidebook Series, UNEP Risø Centre on Energy, Climate and Sustainable Development, Roskilde, Denmark.

Machado, F. S. e Mourato, S. (2002) "Evaluating the Multiple Benefits of Marine Water Quality Improvements: How Important Are Health Risk Reductions?" *Journal of Environmental Management*, 65, 239-250.

Markandya, A., Arnold, S., Cassinelli, M. & Taylor, T. (2008) "Protecting Coastal Zones in the Mediterranean: an economic and regulatory analysis." *Journal of Coastal Conservation*, 12, 145-159.

Martinez, M. L., Intralawan, A., Vazquez, G., Perez-Maqueo, O., Sutton, P. & Landgrave, R. (2007) "The coasts of our world: Ecological, economic and social importance." *Ecological Economics*, 63, 254-272.

McKibbin, W. J. e Wilcoxon, P. J. (1998) "The Theoretical and Empirical Structure of the GCubed Model." *Economic Modelling*, 16, 123-148.

Neves, L. (2003) "Geossintéticos e geossistemas em Engenharia Costeira". Tese de Mestrado apresentada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Nunes, P. (2011) "Análise económica dos custos" [Em Linha]. Disponível: http://www.notapositiva.com/trab_professores/textos_apoio/economia/07analise_econ_custos.htm [Acedido].

OECD (2011) "OECD Environmental Performance Reviews: Portugal 2011." OECD Publishing, <http://dx.doi.org/10.1787/10.1787/9789264097896-en>.

PCM (2009) "Resolução do Conselho de Ministros, nº 82/2009. Diário da República 1.ª série — N.º 174 — 8 de Setembro."

Pelnard-Considère, R. (1956) "Essai de théorie de l'évolution des formes de rivages en plage de sable et de galets." 4th Journées de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No. 1, 289–298.

Perlin, M. D., R.G. (1978) "Prediction of beach planforms with littoral controls." Proceedings of the 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, 1818–1838.

Roebeling, P., Coelho, C. D. e Reis, E. M. (2011a) "Coastal Erosion and Coastal Defense Interventions: a Cost-Benefit Analysis." Journal of Coastal Research, 1415 – 1419.

Roebeling, P., Costa, L., Magalhaes-Filho, L. e Tekken, V. (2011b) "Ecosystem service value losses from coastal erosion in Europe: historical trends and future projections." Unpublished.

Roson, R. (2003) "Modelling the economic impact of climate change." EEE Working Papers Series 9.

Smith, K., Houtven, G. L., Pattanayak, S. e Bingham, T. (2000) "Improving the Practice of Benefit Transfer: A Preference Calibration Approach." U.S. Environmental Protection Agency Office of Water, EPA.

Taborda, R., Magalhães, F. & Ângelo, C. (2005) "Evaluation Of Coastal Defence Strategies in Portugal. Environment Friendly Coastal Protection Structures" Dean, B. e Zimmermann, C. (Eds). Kluwer, Netherlands.

Teixeira, S. B., Furtado, A. & Gaspar, M. (1998) "Avaliação do Impacte da Alimentação Artificial da Praia de Vale do Lobo nas Comunidades de Bivalves (Algarve-Portugal)." Seminário sobre Dragagens, Dragados e Ambientes Costeiros, 47-56.

The World Bank (2011) Inflation, GDP deflator (anual%) [Em linha]:

<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.DEFL.KD.ZG> [Acedido a 23/11/2011].

Tol, R. (2002) "Estimates of the Damage Costs of Climate Change Part 1: Benchmark Estimates." Environmental & Resource Economics. Kluwer Academic Publishers, 21, 47-73.

Turner, R. K., Burgess, D., Hadley, D., Coombes, E. e Jackson, N. (2007) "A cost-benefit appraisal of coastal managed realignment policy." Elsevier, Global Environmental Change 397–407.

Veloso-Gomes, F., F. Taveira Pinto, J.P. Barbosa, L. Neves & C. Coelho. 2002. Littoal 2002. Associação Eurocoast, Portugal: 411-422

Vicente, C., Freire, P. & Clímaco, M. (2004) "Evolução da morfologia costeira. Aplicações de um modelo de linha de costa (LITMOD) - Métodos de Determinação e Representação de Riscos Costeiros." Universidade do Algarve.

Vicente, C. M. e Clímaco, M. (2003) "Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de um Modelo Numérico." Lisboa.

Watanabe, A. (1982) "Numerical models of nearshore currents and beach deformation." Coastal Engineering in Japan, 25, 147–161.

Zerbe, R. O. e Bellas, A. S. (2006) "A primer for Benefit-Cost Analysis." Edward Elgar Publishing Limited.

Anexo 1

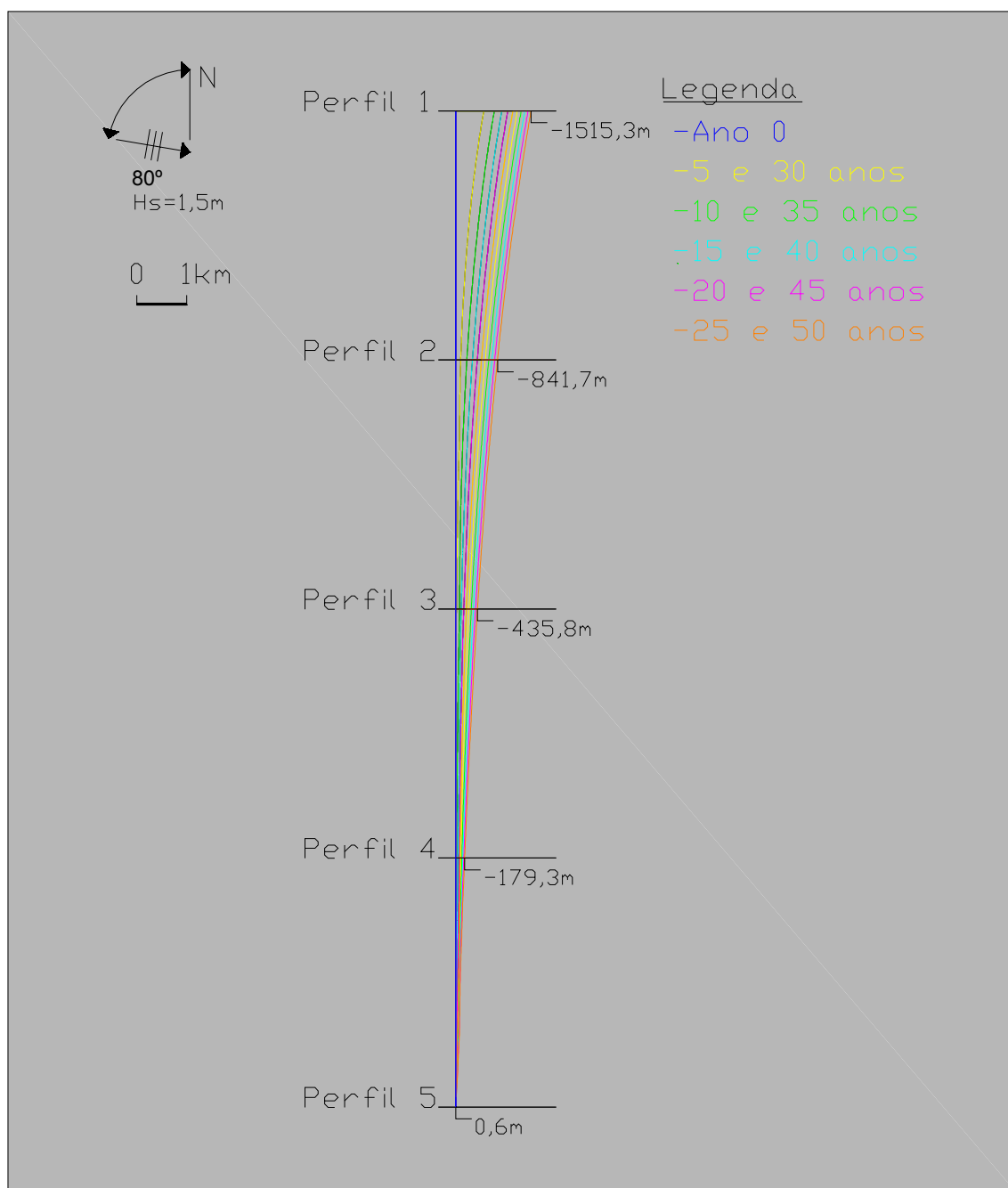


Figura 32 - Representação do cenário 0 (sem alimentação artificial) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.

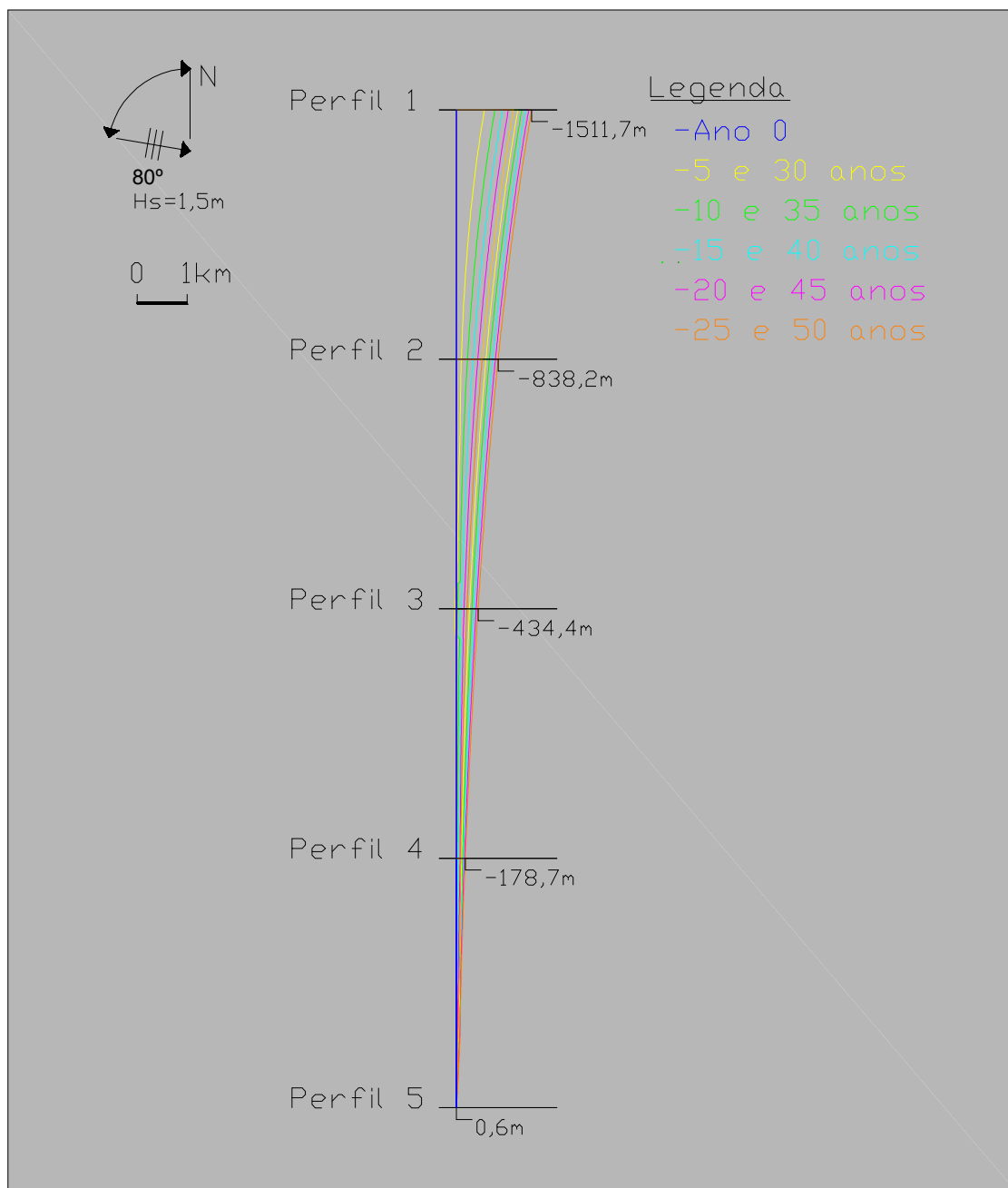


Figura 33 - Representação do cenário 1 ($0,5 \text{ Mm}^3$) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.

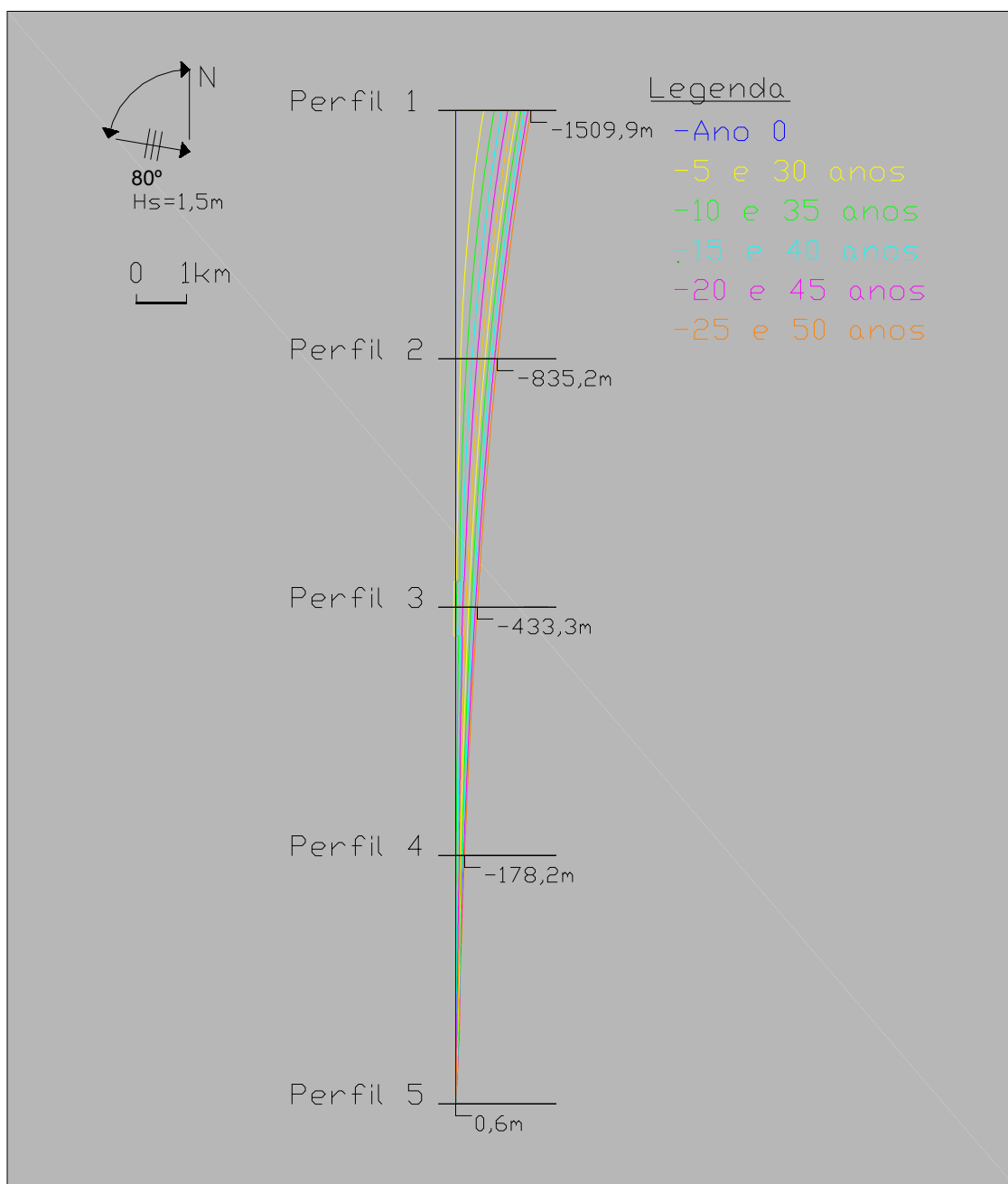


Figura 34 - Representação do cenário 2 (1 Mm³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.

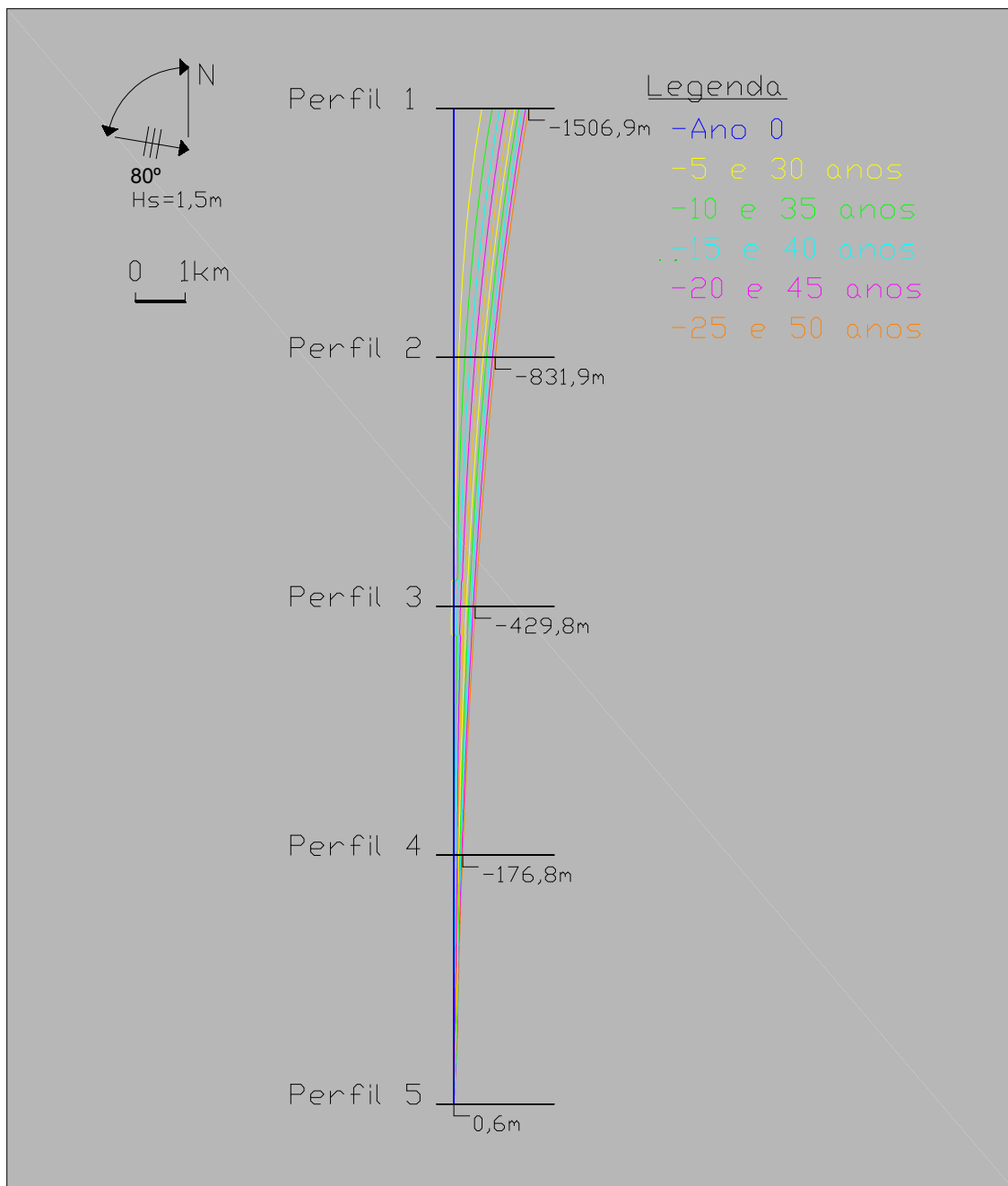


Figura 35 - Representação do cenário 3 (2 Mm³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.

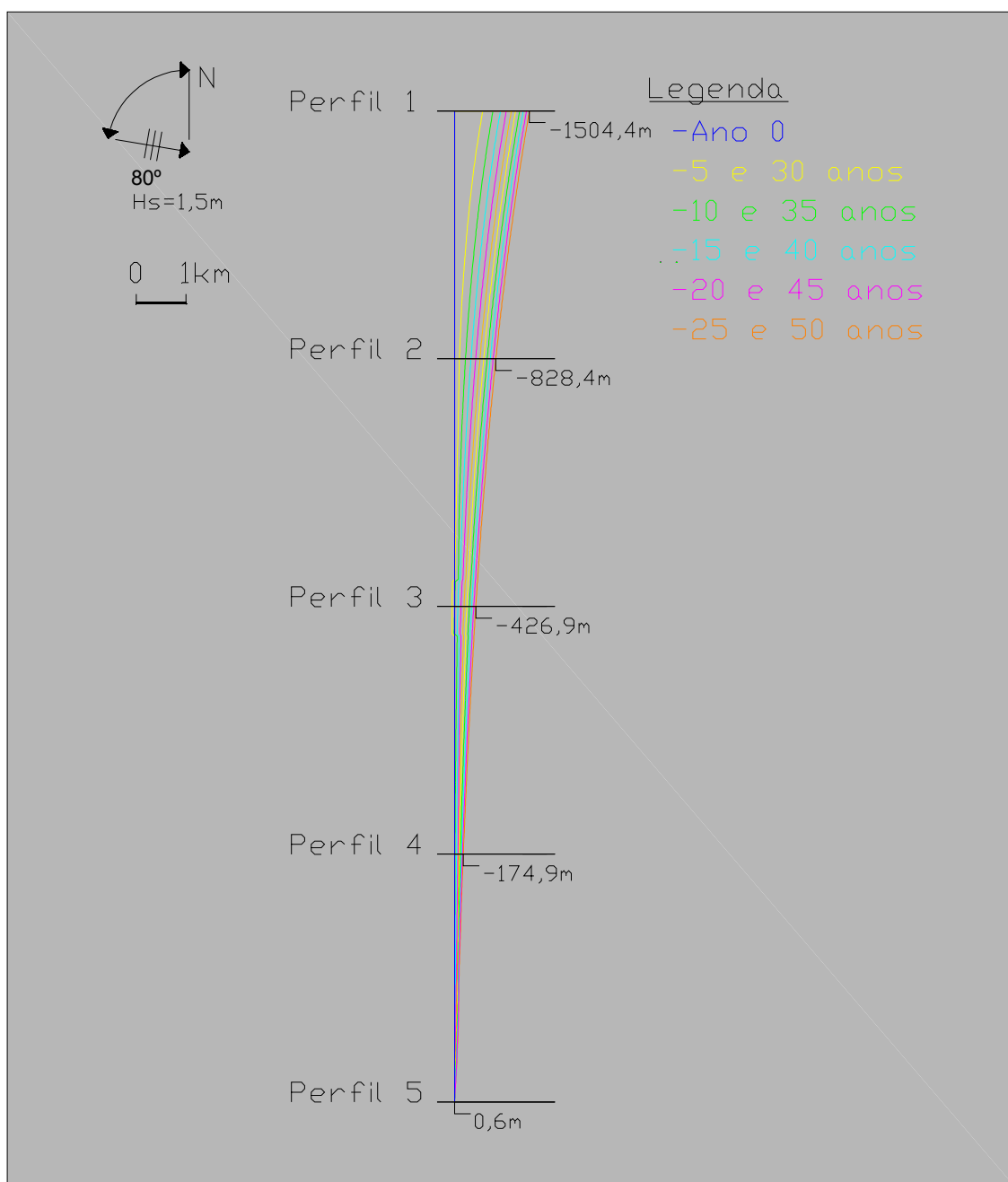


Figura 36 - Representação do cenário 4 (3 Mm³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.

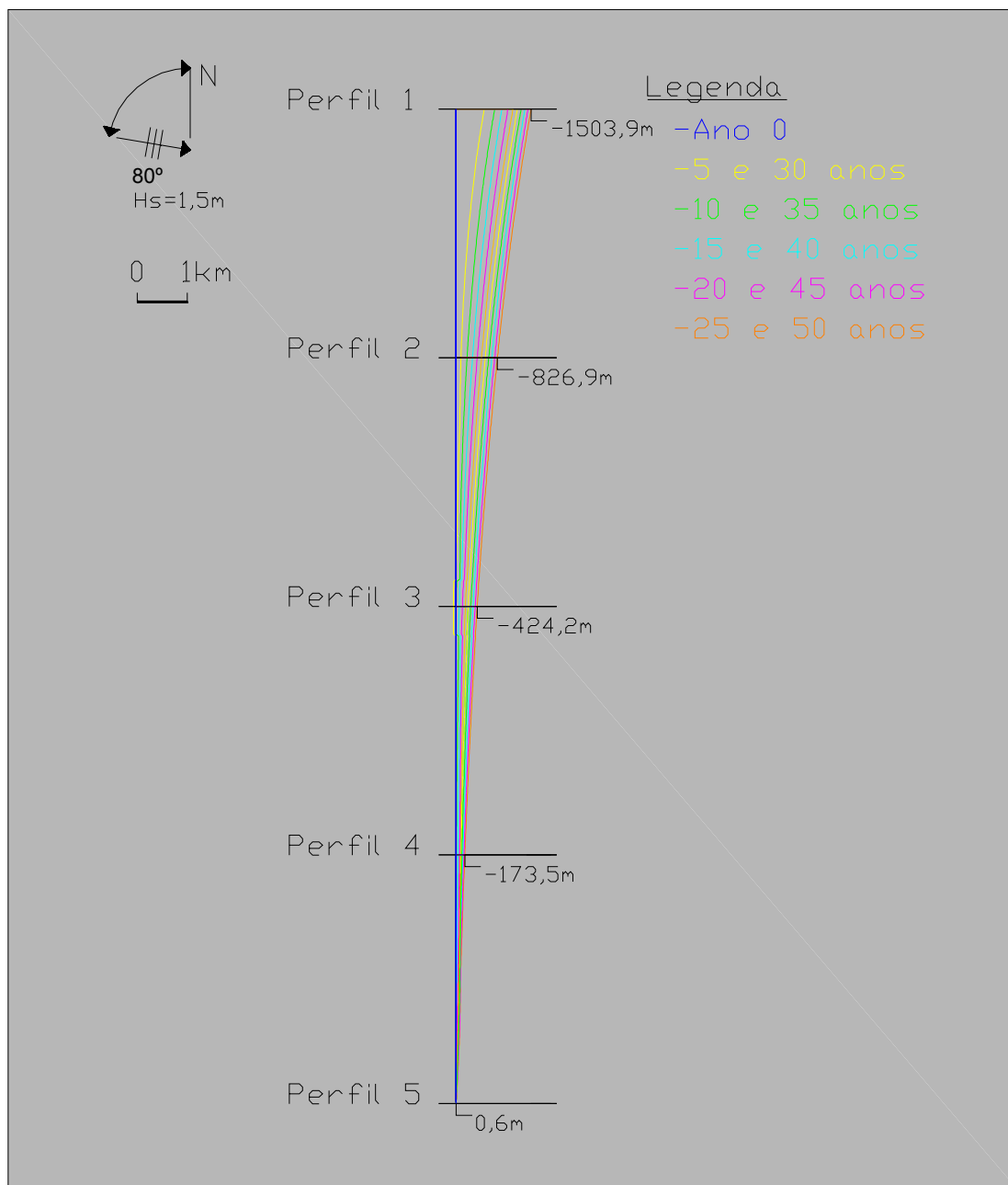


Figura 37 - Representação do cenário 5 (4 Mm³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.

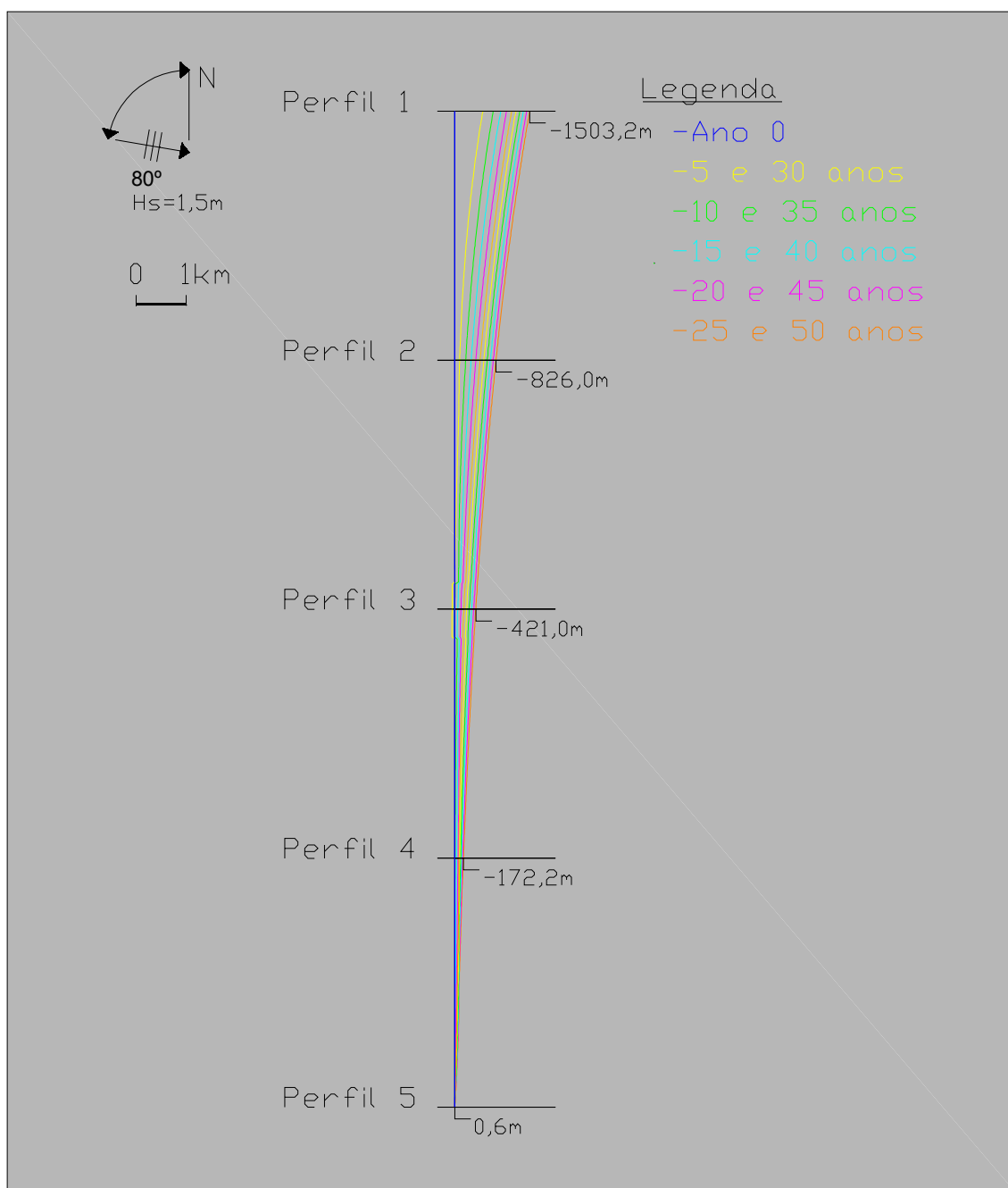


Figura 38 - Representação do cenário 6 (5 Mm³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.

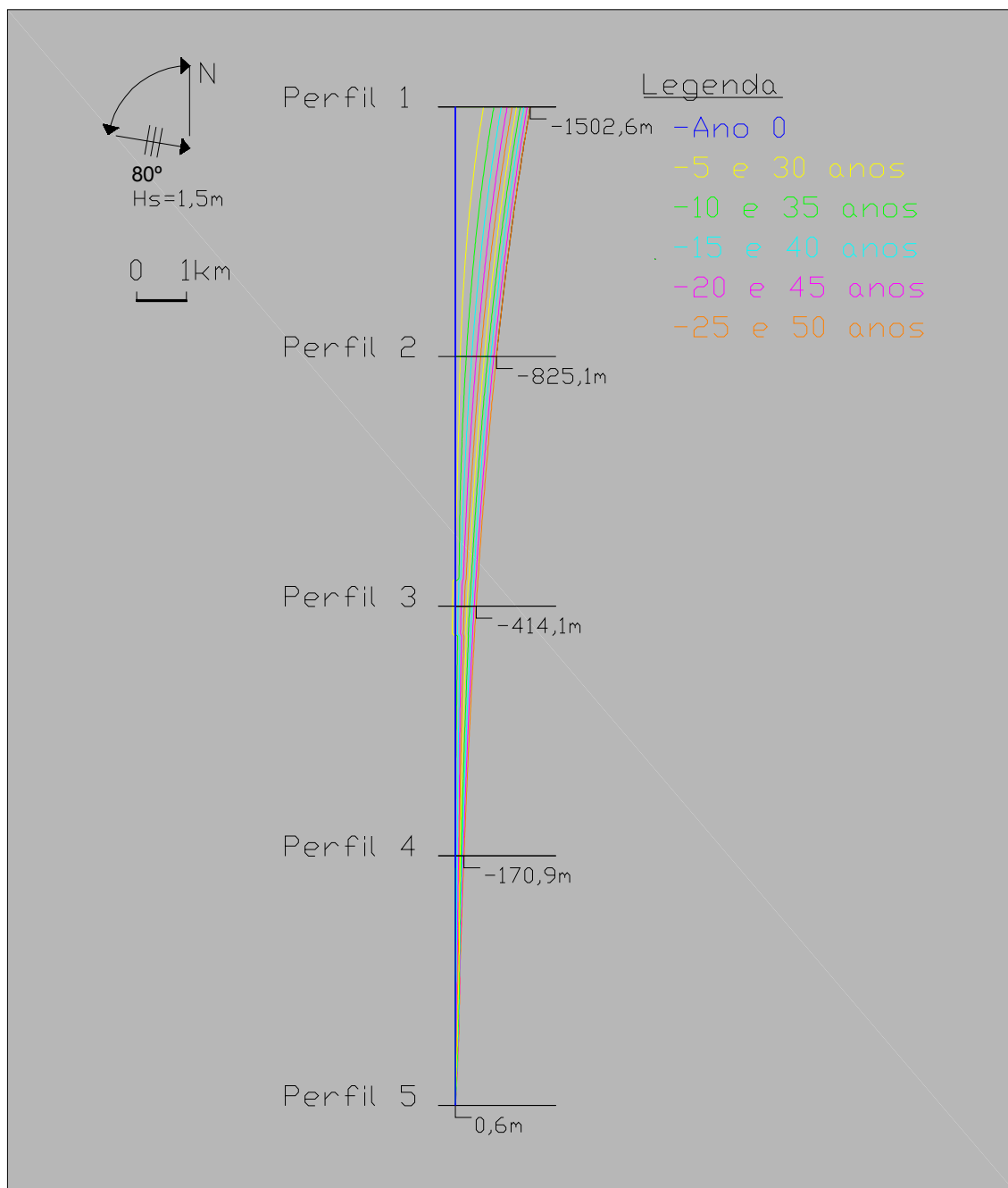


Figura 39 - Representação do cenário 7 (6 Mm³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controle de 5 em 5 anos.

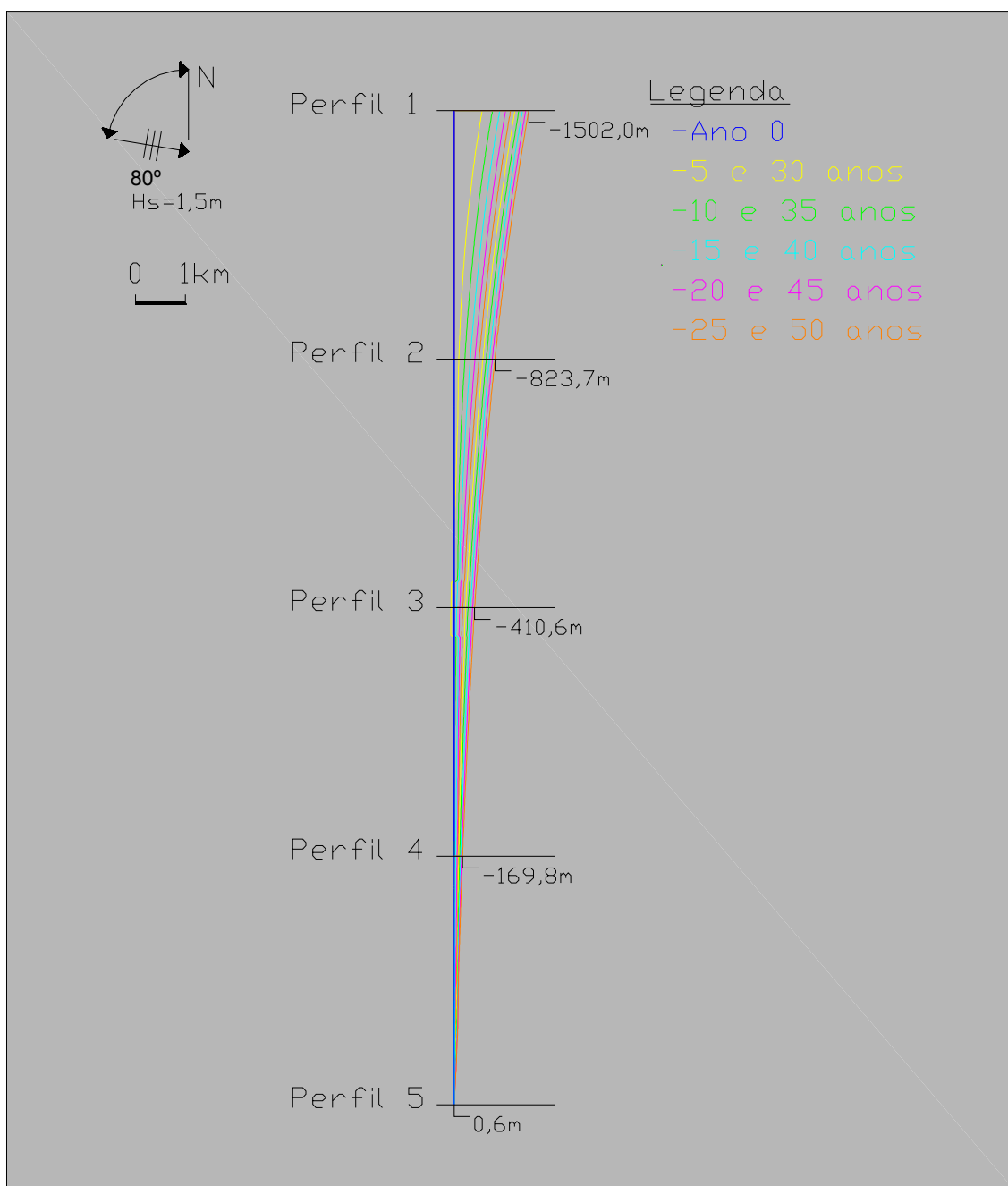


Figura 40 - Representação do cenário 8 (7 Mm³) ao longo de 50 anos, com intervalos de controlo de 5 em 5 anos.